



HAL
open science

La pêche scientifique à l'électricité dans les milieux aquatiques continentaux

Gaëtan Pottier, Didier Azam, Laurent Beaulaton, Thibault Vigneron, Jacques Rives, Frédéric Marchand, Caroline Pénil

► **To cite this version:**

Gaëtan Pottier, Didier Azam, Laurent Beaulaton, Thibault Vigneron, Jacques Rives, et al.. La pêche scientifique à l'électricité dans les milieux aquatiques continentaux. [Rapport de recherche] OFB; INRAE. 2022, 136 p. hal-03715338

HAL Id: hal-03715338

<https://hal.science/hal-03715338v1>

Submitted on 6 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La pêche scientifique à l'électricité dans les milieux aquatiques continentaux





Ce guide est téléchargeable sur le portail technique de l'OFB (<https://professionnels.ofb.fr/fr/node/903>) ainsi que sur le portail partenarial *les documents sur l'eau et la biodiversité* (www.documentation.eauetbiodiversite.fr).

La pêche scientifique à l'électricité dans les milieux aquatiques continentaux



Auteurs

Gaétan Pottier • Didier Azam • Laurent Beaulaton • Thibault Vigneron • Jacques Rives • Frédéric Marchand • Caroline Pénil



Auteurs, contributeurs et remerciements

Cet ouvrage est le fruit d'une collaboration entre INRAE et l'OFB dans le cadre du Pôle OFB-INRAE sur les migrateurs amphihalins. Cette action a été coordonnée par Frédéric Marchand, Didier Azam, Jacques Rives pour INRAE et Émilie Breugnot, Laurent Beaulaton, Sébastien Manné et Thibault Vigneron pour l'OFB.

Auteurs

- Gaétan Pottier¹
- Didier Azam^{2,3}
- Laurent Beaulaton^{3,2}
- Thibault Vigneron⁴
- Jacques Rives⁵
- Frédéric Marchand^{2,3}
- Caroline Pénil⁶

1 HYDRECO, F-97388 Kourou, France

2 INRAE, 1036, U3E, Unité expérimentale d'écologie et d'écotoxicologie aquatique, Pôle pour la gestion des migrateurs amphihalins dans leur environnement, F-35042, Rennes, France

3 OFB, Pôle pour la gestion des migrateurs amphihalins dans leur environnement, Direction de la recherche et de l'appui scientifique, F-35042 Rennes, France

4 OFB, Service Connaissance, Direction régionale Bretagne, F-35510 Cesson-Sévigné, France

5 Université de Pau et des Pays de l'Adour, e2s UPPA, INRAE, ECOBIOP, Pôle pour la gestion des migrateurs amphihalins dans leur environnement, F-64310, Saint-Pée-sur-Nivelle, France

6 OFB, Service Système d'information, outils, analyses, données, Direction de la surveillance, de l'évaluation et des données, F-94300 Vincennes, France

Certains des résultats qui paraissent dans cet ouvrage n'auraient pas pu être acquis sans l'aide des agents de l'U3E, des unités mixtes de recherche ECOBIOP (Écologie comportementale et biologie des populations de poissons) et ESE (Écologie et santé des écosystèmes), de l'OFB (DIR Bretagne-Pays de la Loire et DIR Auvergne-Rhône-Alpes, Services départementaux 56 et 35), des fédérations départementales pour la pêche et la protection des milieux aquatiques 22, 29, 35, 44 et 56 et des associations BGM (Bretagne grands migrateurs), Logrami (Loire grands migrateurs) et Seinormig (Seine Normandie-Nord migrateurs). Un grand merci à eux !

Sommaire



Introduction 10

Partie A – L'électricité 13

1 Caractériser un circuit électrique 14

1.1 Analogie du courant électrique avec de l'eau dans un tuyau 14

1.2 La tension et le gradient de tension 14

1.2.1 La tension 14

1.2.2 Le gradient de tension 15

1.2.3 Mesurer la tension et le gradient de tension dans l'eau 16

1.3 Les formes de courant électrique 18

1.3.1 Le courant alternatif (AC) 18

1.3.2 Le courant continu (DC) 18

1.3.3 Le courant pulsé 19

1.3.4 La fréquence et le rapport cyclique (largeur de la pulsation) 20

1.4 La résistance liée à la conductivité de l'eau 20

1.4.1 Notions de résistance dans un circuit électrique 20

1.4.2 La conductance et la conductivité de l'eau 22

1.4.3 Notion de résistance équivalente 22

1.4.4 Mesurer la résistance équivalente des électrodes 23

1.5 L'intensité et la densité de courant 24

1.6 La puissance et la densité de puissance 24

1.7 L'essentiel à retenir 25

2 L'application de l'électricité dans l'eau: le cas de la pêche à l'électricité 26

2.1 La création du courant par l'engin de pêche à l'électricité 26

2.2 La diffusion du champ électrique dans l'eau 27

2.2.1 La tension de sortie à l'anode et le gradient de tension 27

2.2.2 Le rapport cyclique 27

2.2.3 La fréquence 28

2.3 Les électrodes 29

2.3.1 L'anode 29

2.3.2 La cathode 33



Sommaire

2.4 La puissance requise	34
2.4.1 La puissance de sortie	34
2.4.2 Le facteur de puissance	35
2.5 Le champ électrique fourni par quelques appareils de pêche à l'électricité	35
2.6 Le générateur thermique	38
2.7 La batterie ou accumulateur	38
2.7.1 Généralités	38
2.7.2 La capacité de la batterie	38
2.7.3 La tension fournie par la batterie	39
2.7.4 La résistance interne	39
2.7.5 La charge et la décharge de la batterie	39
2.8 L'essentiel à retenir	40

Partie B – Poissons **41**

3 Le poisson soumis au champ électrique	42
3.1 Les mécanismes physiologiques responsables de la réponse du poisson face au champ électrique	42
3.1.1 Le système neuromusculaire d'un poisson	42
3.1.2 Effet des courants sur le système nerveux des poissons	42
3.1.3 Les paradigmes de Biarritz et de Bozeman	44
3.2 Les zones de réaction du poisson soumis à un champ électrique	44
3.2.1 Pour toutes les formes de courant	44
3.2.2 Exposition au courant continu (DC)	45
3.2.3 Exposition au courant continu pulsé (PDC)	46
3.2.4 Exposition au courant alternatif (AC)	46
3.3 La conductivité de l'eau et du poisson	46
3.4 La théorie des transferts de puissance	48
3.5 L'essentiel à retenir	49

Sommaire



4 Les impacts de la pêche à l'électricité sur l'ichtyofaune	51
4.1 Les impacts généraux	51
4.1.1 Les blessures spinales ou associées	51
4.1.2 L'activité cardiaque	52
4.1.3 L'activité respiratoire	52
4.1.4 Les organes viscéraux	52
4.1.5 La croissance	53
4.1.6 Les œufs de poisson	53
4.1.7 Le stress et le comportement	53
4.1.8 La robustesse et la sensibilité des poissons	54
4.2 L'intensité du champ électrique	54
4.3 La forme du courant	55
4.3.1 La forme de la longueur d'onde	55
4.3.2 La fréquence	55
4.3.3 Le rapport cyclique et la durée des pulsations	56
4.4 La détection et l'évaluation des blessures	56
4.5 L'essentiel à retenir	57
5 Les facteurs qui influent sur l'efficacité de pêche	59
5.1 Les facteurs biotiques	59
5.1.1 Les espèces de poisson	59
5.1.2 Le nombre de poissons présents	60
5.1.3 La taille et la forme du poisson	60
5.2 Les facteurs abiotiques	61
5.2.1 La forme du courant	61
5.2.2 La largeur du site	62
5.2.3 La profondeur du cours d'eau	62
5.2.4 La transparence de l'eau	62
5.2.5 La température de l'eau	62
5.2.6 L'heure de la pêche	63
5.2.7 La conductivité de l'eau	63
5.2.8 Le lit de la rivière	64



Sommaire

5.3	L'expérience de l'opérateur	65
5.4	L'essentiel à retenir	65

Partie C – Mise en œuvre 67

6 Conseils de configuration d'engins de pêche à l'électricité 68

6.1	Les électrodes	68
6.2	Le choix du courant	68
6.3	Le réglage de la tension sur les appareils de pêche à l'électricité	68
6.3.1	Conductivités de 100 à 1 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	68
6.3.2	Ajuster la tension en fonction du champ d'attraction voulu	69
6.3.3	Lors de très faibles conductivités ($\leq 50 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	71
6.4	Réglage de la fréquence en cas d'utilisation du PDC	72
6.5	Réglage du rapport cyclique en cas d'utilisation du PDC	73

7 Moyens de prospection 74

7.1	Pêche à pied en cours d'eau peu profonds	74
7.2	Pêches sur des zones profondes	74
7.2.1	En bateau	74
7.2.2	Utilisation d'un <i>Boom-boat</i>	75

8 Bien-être animal 76

8.1	Réduire le stress	76
8.2	Manipulation des poissons	77
8.3	Contention des poissons	77
8.4	Oxygène et dioxyde de carbone	77
8.5	Température	78
8.6	Désinfection	78

Sommaire



9 Sécurité, réglementation	79
9.1 Différents cas d'accidents	79
9.2 Équipement de protection	79
9.3 Matériel conforme et adapté	80
9.4 Adopter le bon comportement	80
9.5 Autorisations administratives	81
10 Saisie des données	82
Partie D – Livrets de protocoles de pêche à l'électricité	83
Indice d'abondance anguille (IAA)	85
Indice d'abondance saumon (IAS)	91
VIGITRUITE®, indice d'abondance truite (IAT)	97
Pêche toutes espèces et méthodes d'estimation des populations	103
Partie E – Glossaire, références et annexes	111
11 Glossaire	112
11.1 Termes généraux	112
11.2 Termes électriques	112
12 Références	114
13 Annexes	121
13.1 Annexe 1 - Valeurs des résistances équivalentes des électrodes	121
13.2 Annexe 2- Fiches techniques d'engins de pêche à l'électricité	126
13.3 Annexe 3 - Fiche technique de fabrication d'une sonde Penny	133



Résumé et mots-clés

La pêche à l'électricité est une méthode largement utilisée pour les échantillonnages piscicoles en cours d'eau (suivis annuels des populations et des communautés de poissons, approche de types indice poisson rivière ou indicateurs mono spécifiques saumon, anguille, truite). Cependant l'évolution des matériels, de leurs caractéristiques et des réglages possibles ainsi que la formation des personnels utilisant cette technique nécessitent que soient décrits les principaux facteurs influençant la qualité de ces échantillonnages.

Cet ouvrage synthétise l'ensemble des paramètres à connaître et à prendre en compte pour réaliser ou exploiter des pêches scientifiques à l'électricité. Il rappelle les notions de base en électricité, les différentes formes de courant, le gradient de tension ou le rapport cyclique. La réaction des poissons faces à ces types de courant électrique est décrite ainsi que l'impact du réglage des appareils sur leur intégrité. Les différents facteurs qui influent sur l'efficacité de la pêche à l'électricité, qu'ils soient biotiques (espèce, tailles...) ou abiotiques (fréquence du courant ou caractéristiques du cours d'eau comme la largeur, la profondeur, la conductivité...), sont récapitulés.

Sur la base de ces éléments, cet ouvrage fournit des conseils pour la mise en œuvre d'une pêche à l'électricité: la configuration du matériel, le choix du type de courant et les réglages, afin de concilier le meilleur rapport entre l'efficacité de capture et le respect du bien-être des poissons. Il propose également des méthodes pour mesurer certains paramètres tels que le gradient de tension.

Les différentes techniques (à pied ou en bateau) sont ensuite revues et quelques éléments de prévention sont rappelés.

Enfin, des fiches techniques sur des méthodes standardisées de pêches scientifiques à l'électricité (indices d'abondance anguille, saumon, truite ou d'inventaire du peuplement piscicole) sont proposées

Mots-clés:

Pêche à l'électricité • Gradient de tension • Fréquence • Champ électrique • Réglages • Poissons • Indices d'abondance • Protocoles

POUR LA FRANCE MÉTROPOLITAINE
100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ < Conductivité < 10 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$

Matériel nécessaire

Largeur cours d'eau < 5 mètres : 1 anode

Largeur cours d'eau > 5 mètres : 2 anodes

Anode(s) NETTOYÉE(S), enlever les traces d'oxydation

Cathode (1 seule pièce de préférence) aussi grande que possible et bien étalée
Éviter les cathodes en plusieurs brins qui s'entortillent

Si 1 anode : prendre une cathode
aussi grande que possible

Si 2 anodes : doublez la taille
de la cathode si possible

Conductimètre - Thermomètre
Décamètre
Sonde Penny reliée à un oscilloscope/voltmètre digital

Mesurer la conductivité et la température

Choix du courant

DC de préférence
Choix du rayon d'action

Courant pulsé :
Crénelé de préférence
Choix du rayon d'action
20 Hz < Fréquence < 60 Hz
10 % < Rapport cyclique < 50 %
De préférence: rapport cyclique = 25 %

Mesure de la distance du gradient de tension de 0,1 $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$

Orienter la sonde Penny face au centre de l'anode
Visualiser la valeur du gradient de tension sur l'oscilloscope
Dans le cas du PDC, visualiser la valeur du pic du gradient de tension
Ajuster la tension en fonction du rayon d'attraction voulu
Attention : ça ne sert à rien d'avoir un rayon d'attraction plus grand
que la moitié de la largeur du cours d'eau !

Prêt à pêcher !

Introduction



La pêche à l'électricité est une méthode qui est généralement utilisée pour capturer des poissons vivants afin d'assurer des suivis dans le temps, des échantillonnages ponctuels ou des opérations de sauvetage. C'est une méthode efficace pour récolter des informations sur les peuplements piscicoles. En milieu peu profond, cette méthode de capture présente des avantages vis-à-vis de la capture aux filets maillants (Growth *et al.*, 1996; Penczak *et al.*, 1998) ou à la seine (Penczak *et al.*, 1998) pour recenser notamment la richesse spécifique. *A contrario*, en milieu profond, les filets s'avèrent plus efficaces étant donné le champ d'attraction limité de la pêche à l'électricité (Achleitner *et al.*, 2012).

Selon les espèces ou les stades du cycle de vie des poissons, leurs exigences écologiques varient. Cela peut être le cas vis-à-vis de la qualité physico-chimique de l'eau (température, turbidité, pH, conductivité, etc.) ou de l'habitat (zones de reproduction, nurserie, abris, etc.). Ces exigences peuvent être impactées par des pollutions agricoles, industrielles ou domestiques, des dégradations morphologiques (curage, recalibrage, barrage, etc.) et hydrologiques (prélèvement d'eau, régularisation du débit, etc.). Le peuplement piscicole strictement inféodé aux milieux aquatiques intègre toutes ces modifications du milieu. Il est donc considéré comme un bon bio-indicateur. La directive cadre européenne sur l'eau (DCE) demande aux États membres d'atteindre un bon état écologique pour chaque masse d'eau. Pour suivre cet objectif, elle impose la mise en œuvre de programmes de surveillance de l'état écologique des eaux superficielles. Depuis 2007, le réseau de contrôle de surveillance (RCS) a été mis en œuvre pour évaluer l'état des eaux et son évolution au niveau de chaque bassin hydrographique.

L'étude du peuplement piscicole à un instant donné permet d'obtenir des informations d'ordre qualitatif (occurrence des espèces, richesse spécifique) et quantitatif (abondance, recrutement, biomasse, etc.). Ces informations permettent une comparaison avec un peuplement théorique de référence et d'identifier un possible dysfonctionnement du peuplement piscicole observé.

La pêche à l'électricité est basée sur l'utilisation d'un champ électrique qui cause une réaction neuromusculaire aux poissons (Cowx et Lamarque, 1990; Snyder, 2003a). Les causes et les mécanismes amenant la réponse d'un poisson soumis au champ électrique restent controversées (Kolz, 1989; Lamarque, 1990a vs Sharber et Black, 1999), alors que le principe général ne l'est pas. Le champ électrique stimule le système nerveux induisant une réponse musculaire (volontaire ou non) du poisson, le forçant ainsi à se rapprocher de l'anode jusqu'à devenir immobile (tétanie).

Bien que la pêche à l'électricité soit un moyen efficace, elle peut engendrer des dommages sur les poissons (Gatz *et al.*, 1986; Hollender et Carline, 1994; Mesa et Schreck, 1989; Sharber et Carothers, 1988; Snyder, 2003a). Ces dommages sont causés lorsque les poissons restent trop longtemps dans la zone de tétanie (Snyder, 2003a).

Le choix des réglages des appareils de pêche à l'électricité doit donc résulter d'un compromis entre l'efficacité d'attraction du champ électrique et le bien-être animal.

Les appareils de pêche à l'électricité ont vu le jour en Allemagne avant la seconde guerre mondiale. En France, l'intérêt de tels engins a été pris en considération à partir de 1959 (Vibert et Cuinat, 1961). Les premiers modèles d'engins de pêche à l'électricité français ont été mis au point par la Station

d'hydrobiologie continentale de Biarritz (SHCB) de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA). Un des premiers modèles conçu est l'Électro-pullman moyen coupable (EPMC) qui a été mis au point avec la collaboration des établissements Électro-Pullman (Cuinat, 1965). Il s'agissait d'un appareil alimenté à l'aide d'un générateur thermique et qui produisait du courant continu (DC). Plus tard, en 1971, un appareil portable, le Martin-pêcheur®, a été développé par la SHCB (Gosset *et al.*, 1971). Il produit un courant pulsé à partir de batteries. Pour prospecter dans les eaux saumâtres, le modèle Cormoran® a ensuite été créé (Gosset, 1975 dans Gosset, 1976). Puis en 1976, dans le but de moderniser les engins alimentés par un générateur thermique, le Héron® a été élaboré (Gosset, 1976). Enfin le modèle Albatros® a été conçu pour pouvoir pratiquer la pêche à l'électricité dans les milieux marins (Lamarque, 1977).

Dès 1969, l'idée de comparer l'efficacité de différents modèles d'engin de pêche émerge (Chmielewski *et al.*, 1973). La SHCB s'est focalisée sur la recherche des effets du courant sur la physiologie des poissons (Lamarque, 1968) et sur les meilleures formes de courant (Lamarque, 1976).

À partir de 1980, avec le départ de P. Lamarque, les travaux liés au développement ou à l'amélioration d'engins de pêche à l'électricité ont fortement diminué en France.

Ce n'est que dans les années 2000 que la question d'homogénéité des pratiques de la pêche à l'électricité réapparaît. Sremski (2001) a comparé les résultats obtenus à l'aide de deux engins (Héron® ou Martin-pêcheur®) qui produisaient des courants de formes différentes. Il suggérait que les résultats pouvaient différer si le matériel utilisé changeait.

Par ailleurs, les échantillonnages piscicoles peuvent être effectués par des sous-traitants. Les agents de l'OFB ont révélé des anomalies importantes sur les niveaux de captures. Une session de comparaison entre les pratiques (techniques et matériels) utilisées par l'OFB et des sous-traitants a été organisée. Il s'est avéré que les engins n'étaient pas réglés de la même manière selon l'opérateur et une différence du nombre de poissons capturés était observée (Vigneron *et al.*, 2013).

Actuellement le matériel utilisé est de conception relativement ancienne et de nouveaux modèles qui proposent des gammes et des formes de courants différentes arrivent sur le marché. La Circulaire DCE 2006/16 du 13/07/06 cadre la constitution et la mise en œuvre du programme de surveillance (contrôle de surveillance, contrôles opérationnels, contrôles d'enquête et contrôles additionnels) pour les eaux douces de surface (cours d'eau, canaux et plans d'eau). Dans ce cadre réglementaire, la norme NF EN 14011 (Afnor, 2003), à laquelle doivent se conformer les prélèvements de l'ichtyofaune pour le programme de surveillance DCE, recommande un étalonnage des nouveaux appareils de pêche à l'électricité par rapport aux anciens.

Il existe également des ouvrages de synthèse en anglais qui relatent les dernières connaissances sur la pêche à l'électricité (Beaumont, 2011, 2016; Reynolds et Kolz, 2012; Lamarque, 1990a; Vibert, 1968), mais pas en français.

Cet ouvrage est destiné principalement aux utilisateurs d'appareils de pêche à l'électricité. Les principes de la pêche à l'électricité y sont rappelés. Les impacts de l'application d'un champ électrique sur l'ichtyofaune y sont également traités. Il doit permettre à un opérateur de bien comprendre le fonctionnement de la pêche à l'électricité. Cela va de la configuration d'un engin de pêche à la mise en œuvre de protocoles standardisés.

A L'électricité



© Michel Monsay - OFB

- | | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Caractériser un circuit électrique | 14 |
| 2 | L'application de l'électricité dans l'eau:
le cas de la pêche à l'électricité | 26 |



1 Caractériser un circuit électrique

Un courant électrique est caractérisé par différentes grandeurs qui sont présentées dans les parties suivantes.

1.1 Analogie du courant électrique avec de l'eau dans un tuyau

Cette analogie entre l'eau et le courant électrique permet de comprendre facilement le cheminement du courant électrique et le fonctionnement des composants qui en découle (Figure 1). La montée d'eau est alimentée par une pompe G qui est le générateur en électricité. L'eau arrive dans un réservoir de stockage qui représente une batterie (B). L'eau s'écoule ensuite par gravité. La hauteur entre le niveau supérieur de l'eau et l'axe de la turbine est appelée Hauteur d'élévation Totale en hydraulique, il s'agit de l'équivalent de la différence de potentiel (ddp) en électricité, autrement dit la tension U. Le débit de l'eau transitant dans le tuyau correspond à l'intensité I du courant électrique. Il y a du débit uniquement si la vanne, correspondant à l'interrupteur (In), est ouverte. Le rétrécissement du tuyau limite le courant, il est l'équivalent de la résistance électrique ou de l'inverse de la conductance. Une fois la turbine actionnée par l'eau, elle produit une puissance mécanique qui est l'analogie de la puissance électrique.

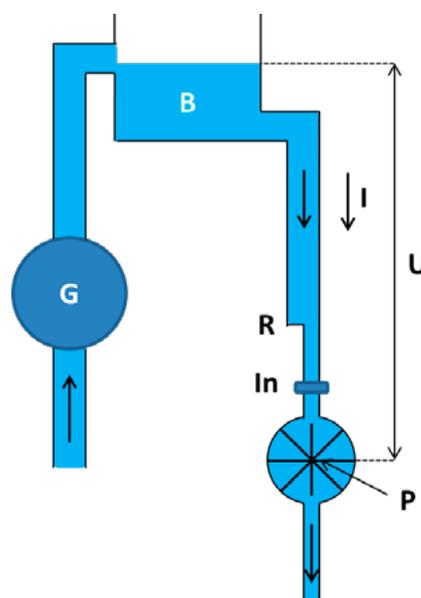


Figure 1. Eau dans un tuyau avec les termes liés à électricité.
G: générateur, B: batterie, I: intensité, In: Interrupteur, U: tension,
R: résistance, P: puissance

1.2 La tension et le gradient de tension

1.2.1 La tension

La tension notée U est la somme de l'énergie potentielle stockée par unité de charge électrique, exprimée en volts (V) ou joules.coulomb⁻¹. Les lignes de flux (ou courant) représentent les directions du courant dans un champ électrique autour et entre des électrodes de polarités opposées. La tension est l'analogie de la pression de l'eau dans le tuyau.

Plusieurs grandeurs de tensions peuvent caractériser un courant (Figure 2):

- le pic de tension (*peak voltage*) noté V_{pk} est la valeur de tension maximale du courant;
- l'amplitude de tension (*peak-to-peak voltage*) noté V_{pp} est la différence de tension entre la valeur minimale et la valeur maximale de tension;
- la racine carrée de la moyenne du carré de la tension (*root mean square voltage*) noté V_{rms} . Elle quantifie l'équivalent de tension qu'il y aurait pour une même puissance utilisée lors de l'application de courant continu. Elle peut être considérée comme la tension moyenne lors de l'application du courant électrique. Sa formule est la suivante:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt}$$

Équation 1

L'amplitude de tension V_{pp} est utilisée pour caractériser les tensions qui peuvent avoir des valeurs négatives (notamment le courant alternatif noté AC). Lors de l'utilisation du courant continu (DC) les valeurs de la V_{pk} et de la V_{rms} sont identiques et celle de la V_{pp} est égale à zéro. Par contre lors de l'utilisation du courant continu pulsé, les valeurs de la V_{pk} et de la V_{rms} sont différentes. La valeur de la V_{rms} sera inférieure à celle de la V_{pk} qui indique la valeur maximale de courant.

En général, les voltmètres standards peuvent mesurer la tension pour des courants de types continus et alternatifs. Par contre s'ils mesurent un courant continu pulsé, ils indiquent en général la valeur de la V_{rms} . Pour mesurer la valeur de V_{pk} et celle de V_{pp} , il faut utiliser un oscilloscope ou un voltmètre digital.

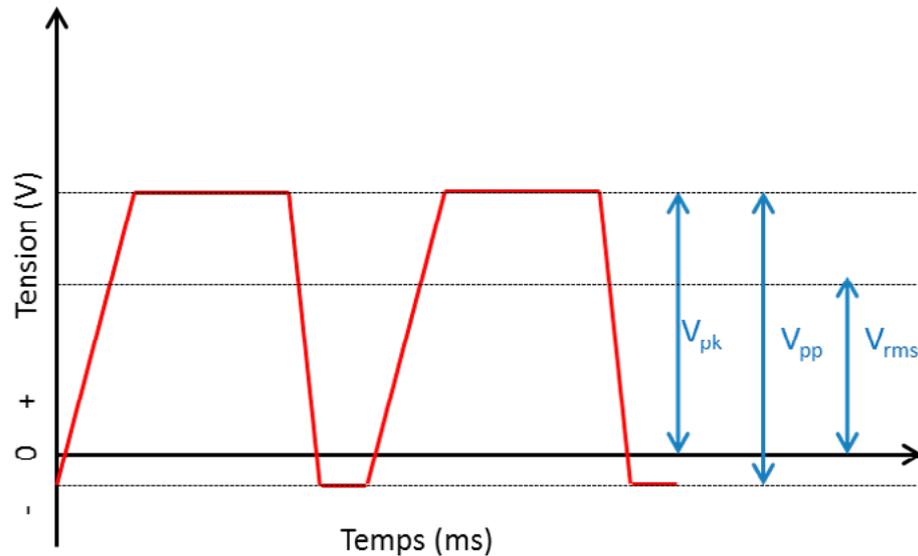


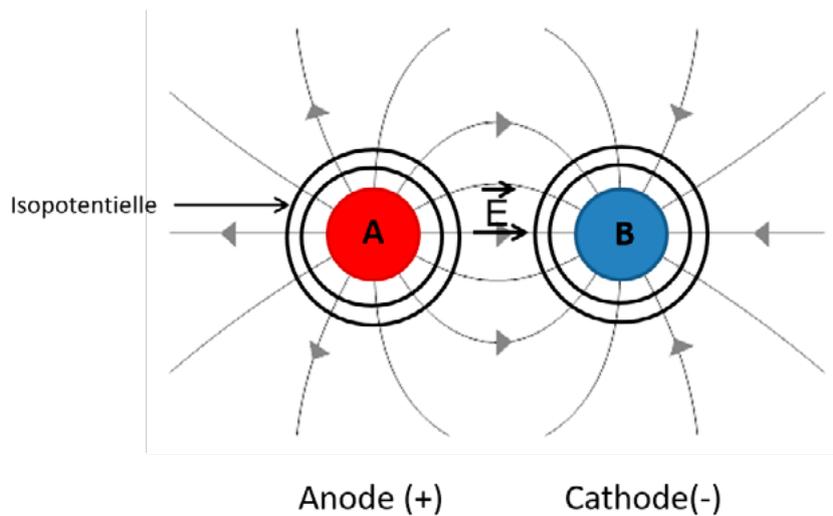
Figure 2. Les différentes grandeurs de tension mesurables sur un courant continu pulsé.

V_{pk} : pic de tension, V_{pp} : amplitude de tension, V_{rms} : racine carrée de la moyenne du carré de la tension

1.2.2 Le gradient de tension

Lorsque le courant électrique est appliqué dans un volume d'eau d'une électrode à une autre, il se dissipe sous la forme d'un champ (Figure 3). Pour caractériser ce champ, il est possible de mesurer le gradient de tension.

Le gradient de tension, noté \vec{E} , est la moyenne des différences de tension par unité de distance entre deux points situés à des distances différentes d'une électrode. Il est couramment exprimé en $V.cm^{-1}$. Il est souvent noté sous la forme d'un vecteur \vec{E} indiquant sa direction et sa valeur. Le gradient de tension caractérise les surfaces isopotentielles.



Une surface isopotentielle est perpendiculaire aux lignes de flux. Elle est définie par un jeu de points qui ont la même différence de tension à partir de la surface de l'électrode.

Les surfaces isopotentielles sont distribuées autour de chaque électrode, à la manière de couches concentriques, dont chacune superposée sur l'autre possède un gradient de tension inférieur à celle qu'elle recouvre. Autrement dit, plus la surface isopotentielle est éloignée de l'électrode, plus le gradient de tension diminue. À une certaine distance de l'électrode, le gradient de tension est tellement bas qu'il n'a plus d'effet sur les organismes vivants.

Figure 3. Le déplacement du courant dans l'eau de l'anode (A) vers la cathode (B). Le gradient de tension a une dimension de puissance et d'orientation.

1.2.3 Mesurer la tension et le gradient de tension dans l'eau

Il existe deux méthodes pour décrire la tension dans la masse d'eau (Figure 4) : mesurer la tension ou le gradient de tension. La première consiste à mettre en contact une cosse du voltmètre 1 (la rouge dans la Figure 4) avec l'électrode 1 et faire bouger l'autre cosse (la bleue dans la Figure 4) de cette électrode jusqu'à l'électrode 2 en passant par la masse d'eau. Lorsque la cosse bleue est sur l'électrode 1, il n'y a pas de tension du fait qu'il n'y ait pas de différence de potentiel (Figure 5). Mais lorsque la cosse bleue se déplace dans l'eau en direction de l'électrode 2, la tension mesurée va augmenter (Figure 5). Dans le cas où la forme et l'orientation des deux électrodes sont identiques, la mesure située à équidistance des deux électrodes indiquera une tension égale à 50 % de la tension entre les deux électrodes. La tension mesurée atteint un maximum lorsque la cosse bleue est en contact avec l'électrode 2 (Figure 5).

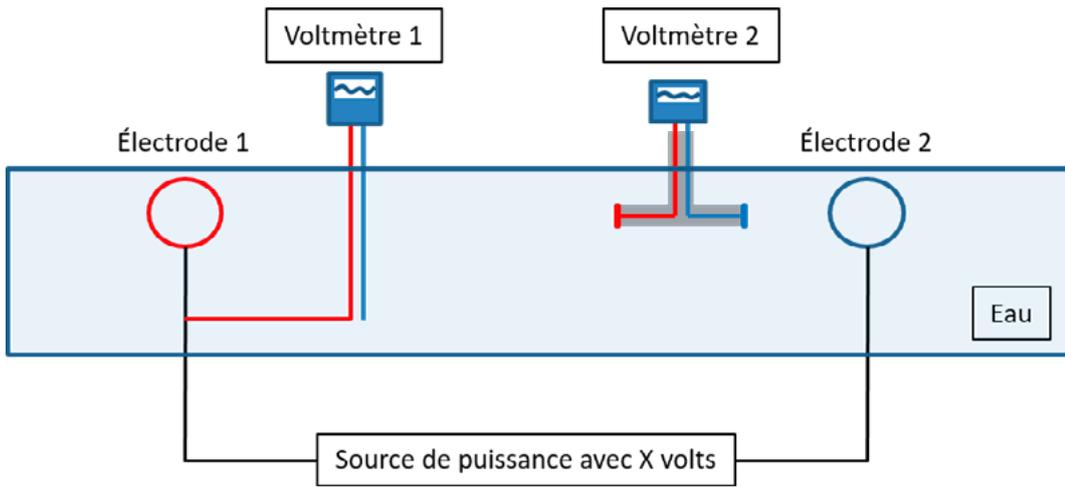


Figure 4. Deux protocoles pour mesurer le gradient de tension dans une masse d'eau à l'aide d'un voltmètre.

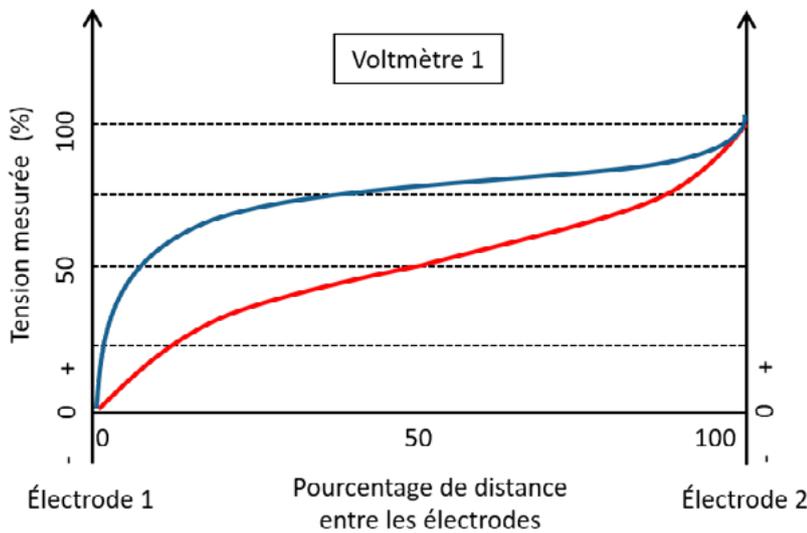


Figure 5. Profil de la tension en forme de «S» obtenu à l'aide du voltmètre 1. La courbe rouge présente un profil lorsque les résistances des électrodes sont équilibrées. La courbe bleue présente un profil lorsque les résistances des électrodes sont déséquilibrées, avec la résistance de l'électrode 1 supérieure à celle de l'électrode 2.

La deuxième méthode consiste à mesurer le gradient de tension grâce à une sonde Penny (*Penny probe* nommée par W.G. Hartley car les extrémités étaient constituées de vieilles pièces de monnaie anglaise en cuivre ; Figure 7 et Figure 8). Les cosses de la sonde Penny ont toujours un espacement constant. Cette sonde est connectée au voltmètre 2 (Figure 4). En tournant la sonde sur elle-même dans le plan parallèle au sol, les valeurs maximales et minimales du gradient de tension peuvent être obtenues pour n'importe quelle position autour de l'électrode. Le gradient de tension est maximal lorsque la sonde est en direction du centre de l'anode, et minimal lorsqu'elle est perpendiculaire. Le gradient de tension est maximal aux abords de l'électrode et baisse lorsque la sonde s'en éloigne (Figure 6). Dans le cas où la forme et l'orientation des deux électrodes sont identiques, la mesure située à équidistance des deux électrodes indiquera la valeur minimale du gradient de tension.

Le profil du champ électrique (Figure 6) peut être établi quelle que soit l'électrode ou la combinaison de tension. Il faut veiller à ne pas entrer directement en contact avec les électrodes et s'assurer d'une totale isolation des matériaux du fait des fortes tensions susceptibles d'être utilisées. Grâce à ce protocole, il est aussi possible de mesurer la fréquence, la V_{pk} et la V_{rms} .

Les profils de forme « S » (Figure 5) ou « U » (Figure 6) sont symétriques lorsque les deux électrodes présentent la même résistance équivalente (la résistance équivalente est vue en 1.4.3; Kolz, 1993). Les configurations créées à l'aide d'électrodes qui possèdent des résistances très différentes vont engendrer un déséquilibre. Les profils de forme « S » vont posséder une courbe abrupte (Figure 5) au niveau d'une des électrodes et les profils de type « U » vont être plus encaissés (Figure 6). Ces courbes asymétriques soulignent une hausse de gradient de tension qui peut être dangereuse pour les poissons.

La distribution du gradient de tension devrait être la même quelle que soit la plage de conductivité (allant de 10 à $1500 \mu S.cm^{-1}$) (Snyder, 2003a).

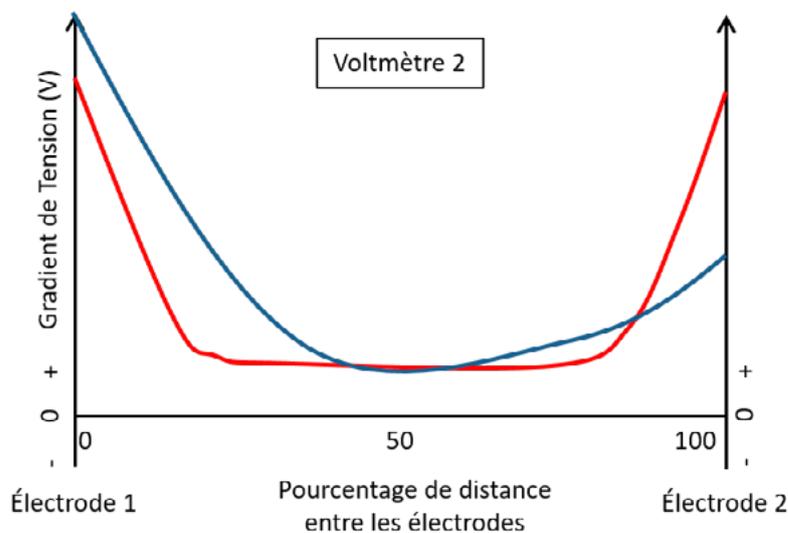


Figure 6. Profil du gradient de tension en forme de « U » obtenu à l'aide du voltmètre 2. La courbe rouge présente un profil lorsque les résistances des électrodes sont équilibrées. La courbe bleue présente un profil lorsque les résistances des électrodes sont déséquilibrées, avec la résistance de l'électrode 1 supérieure à celle de l'électrode 2.

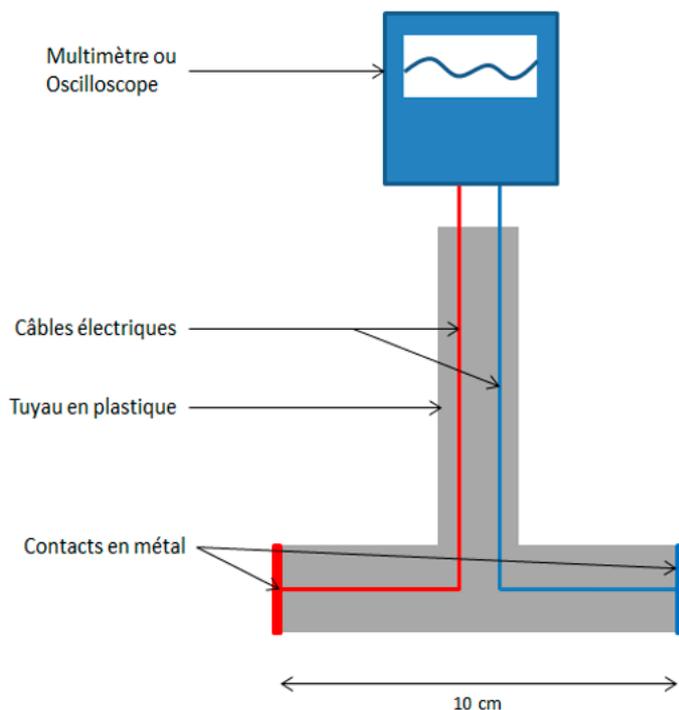


Figure 7. Schéma d'une sonde Penny reliée à un oscilloscope pour mesurer le gradient de tension.



Figure 8. Sonde Penny reliée à un oscilloscope portable.

© Gaëtan Pottier - INRAE

1.3 Les formes de courant électrique

Le signal électrique fourni par les appareils de pêche peut prendre plusieurs formes : courant continu (DC), courant pulsé et courant alternatif (AC). En France, l'AC est interdit du fait de sa grande nocivité sur le poisson et sa dangerosité pour l'Homme. Seuls le DC et le courant pulsé sont utilisés.

1.3.1 Le courant alternatif (AC)

La tension change de polarité deux fois par période. La durée de la période peut être variable. Les tensions sont alternativement égales au niveau des deux polarités, ce qui confère au courant une moyenne de tension égale à zéro. Le courant alternatif peut être monophasé ou multiphasé (couramment 3 phases, Figure 9 A et B). La forme la plus utilisée de courant alternatif est la forme sinusoïdale (Figure 9).

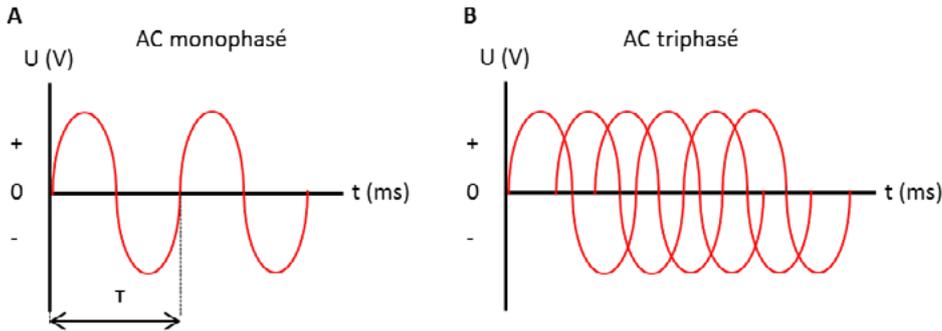


Figure 9. A : profil d'un courant alternatif sinusoïdal monophasé.
B : profil d'un courant alternatif sinusoïdal triphasé,
U : tension, t : temps, T : période du signal.

1.3.2 Le courant continu (DC)

Le terme courant continu désigne un courant dont la tension reste constante tout au long du temps. Il existe deux formes de courant continu (Figure 10). La première est dite lisse, elle est générée par une batterie ou un générateur DC. La seconde forme présente des légères ondulations, elle est dite ondulée. Le DC ondulé ou redressé est créé à partir d'un courant alternatif qui subit un redressement de la tension à l'aide d'un pont de diodes et un lissage à l'aide d'un condensateur.

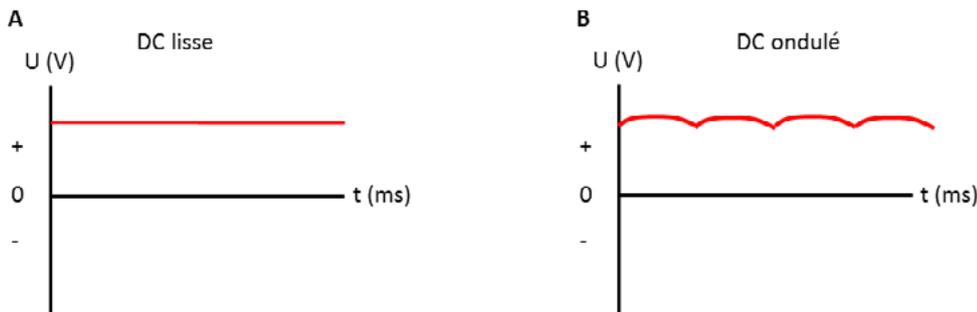


Figure 10. A : profil d'un courant continu lisse.
B : profil d'un courant continu ondulé,
U : tension, t : temps

1.3.3 Le courant pulsé

Le courant continu pulsé désigne des pulsations de courant. Le nombre de pulsations par seconde est la fréquence, mesurée en hertz (Hz). Le courant continu pulsé est unidirectionnel, il ne présente pas de valeur négative contrairement à l'AC. Cette forme de courant demande moins de puissance que le DC. Il existe plusieurs formes de courant pulsé dont l'AC qui subit simplement un redressement double alternance (les formes négatives sont converties en positives, Figure 11A); ou un redressement simple alternance (la partie négative du AC est annulée, Figure 11B). La forme d'un quart de sinusoïde est aussi créée à partir de l'AC (Figure 11C).

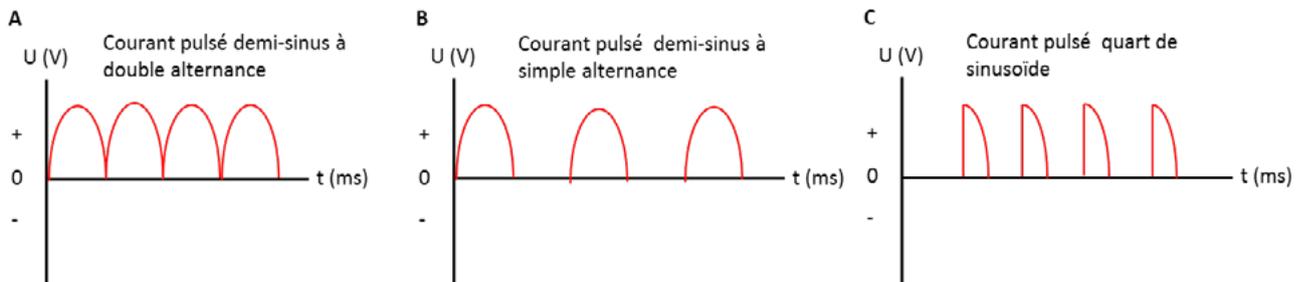


Figure 11. A: profil d'un courant continu pulsé demi-sinus à double alternance.

B: profil d'un courant continu pulsé demi-sinus à simple alternance,

C: profil d'un courant pulsé quart de sinusoïde,

U: tension, t: temps

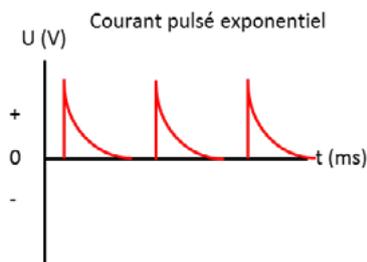


Figure 12. Profil d'un courant continu pulsé exponentiel.

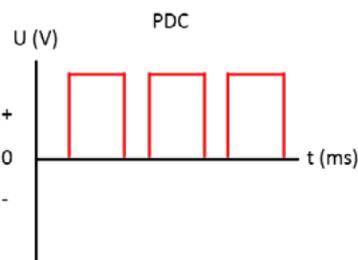


Figure 13. Profil d'un courant continu pulsé crénelé.

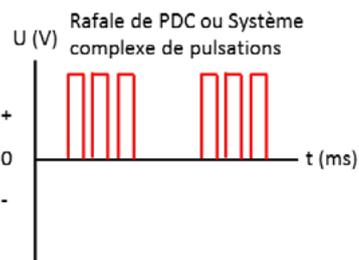


Figure 14. Profil d'une rafale de PDC: système complexe de pulsation.

La forme de courant pulsé exponentielle est générée par une décharge de condensateurs qui sont au préalable chargés (Figure 12). Du fait du faible temps de décharge, cette forme a l'avantage de proposer de fortes tensions avec des périodes courtes, ce qui permet l'utilisation de peu de puissance. L'inconvénient est que le temps de décharge n'est pas contrôlé. Il dépend de la résistance du système électrique et de la taille des condensateurs. Pour des réglages de tension identique, le temps de décharge va varier en fonction de la conductivité.

Les boîtes de contrôle d'impulsions permettent de créer des formes de courant continu pulsé (PDC) (Figure 13). Ce courant est généré en interrompant le courant continu. Lors de l'utilisation de cette forme d'onde, il est possible de contrôler la durée des périodes et la fréquence et par conséquent la puissance de sortie. Quelques engins peuvent créer une forme spéciale de PDC: la rafale de PDC (*gated burst PDC* en anglais) autrement appelée système complexe de pulsations (*complex pulse system* en anglais). Cette forme est une série de pulsations à hautes fréquences qui est répétée dans un motif à une fréquence inférieure. Autrement dit, il s'agit de PDC de PDC (Figure 14).

1.3.4 La fréquence et le rapport cyclique (largeur de la pulsation)

Ces grandeurs ne concernent pas le DC mais s'appliquent aux courants pulsés et à l'AC.

La fréquence est le nombre de motifs du courant produits par seconde. La fréquence s'exprime généralement en hertz (Hz). Elle est calculée à l'aide de l'Équation 2, avec T la période en secondes.

$$f = \frac{1}{T} \tag{Équation 2}$$

Le rapport cyclique (*duty cycle* en anglais) exprimé en pourcentage, correspond au pourcentage de la durée de l'état haut (t_1) du signal par rapport à la durée de la période T. Dans le cas du PDC, pour obtenir la valeur en pourcentage, le rapport cyclique est calculé à l'aide de l'Équation 3.

$$\text{rapport cyclique} = \frac{t_1}{T} \times 100 \tag{Équation 3}$$

Par exemple, un rapport cyclique de 20 % peut être obtenu avec une largeur de la pulsation de 10 ms à 20 Hz ou avec une largeur de pulsation de 5 ms à 40 Hz (Figure 15).

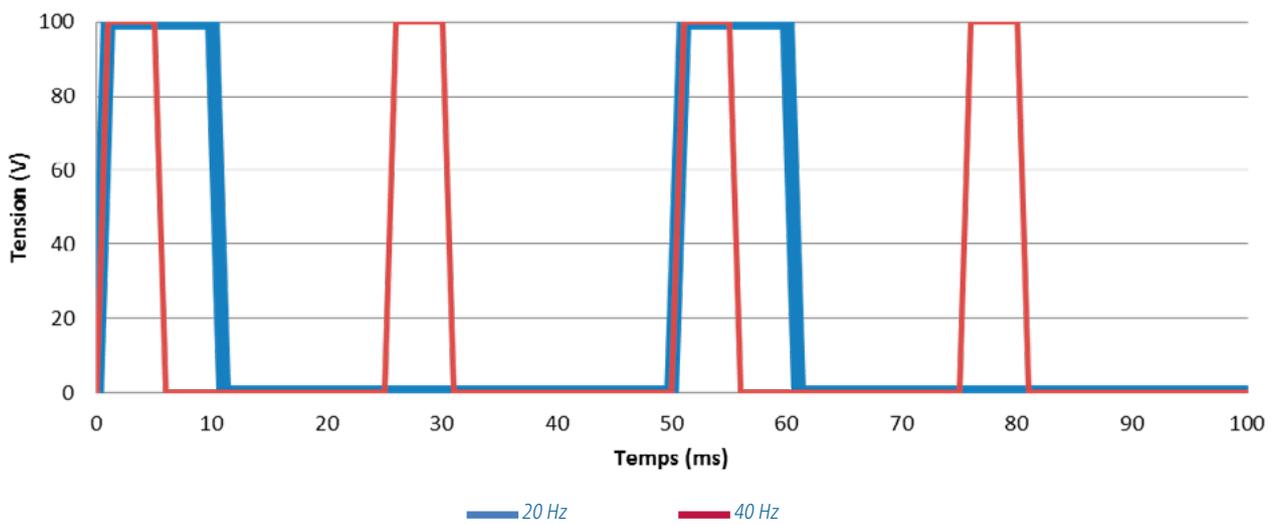


Figure 15. Représentation de deux formes de courant avec un même rapport cyclique de 20 % et deux fréquences différentes.

1.4 La résistance liée à la conductivité de l'eau

1.4.1 Notions de résistance dans un circuit électrique

Le terme résistance, noté R et d'unité ohm (Ω), peut avoir deux significations différentes. Une résistance peut désigner un dipôle non polarisé ou une grandeur électrique qui caractérise les dipôles résistants et les matériaux conducteurs. Une résistance permet de diminuer l'intensité du courant électrique. Cette diminution est d'autant plus forte que la valeur de la résistance est élevée. Elle peut être comparée au rétrécissement du diamètre d'un tuyau conduisant de l'eau.

La connaissance de la résistance permet de calculer la puissance nécessaire à fournir par le générateur pour obtenir une tension voulue.

Lorsque le circuit contient plus d'une résistance électrique, la résistance équivalente doit être calculée. La résistance équivalente est un terme qui consiste à remplacer un ensemble de résistances par une seule qui est équivalente pour le reste du circuit. L'étude du circuit électrique est donc simplifiée.

Généralement deux relations permettent de calculer la résistance équivalente pour deux associations de résistances :

- en série, les résistances sont traversées par la même intensité;
- en parallèle ou dérivation, les résistances ont une tension égale à leurs bornes.

Considérons un circuit de pêche à l'électricité constitué d'une anode et d'une cathode. Cette configuration est montrée dans la Figure 16. Les résistances sont notées respectivement R1 et R2 et la résistance équivalente est notée Req. Lorsque R1 et R2 sont en série, Req est égale à la somme des résistances (Équation 4).

$$Req = R1 + R2 \tag{Équation 4}$$

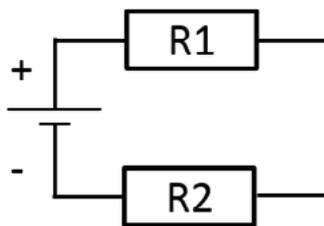


Figure 16. Circuit électrique avec les résistances en série.
R1 : résistance de l'anode, R2 : résistance de la cathode

Dans un circuit en parallèle, ce sont les conductances qui s'additionnent. La conductance est l'inverse de la résistance. Donc l'inverse de la résistance équivalente est égal à la somme des inverses de chacune des résistances (Équation 5, Figure 17).

$$\frac{1}{Req} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \tag{Équation 5}$$

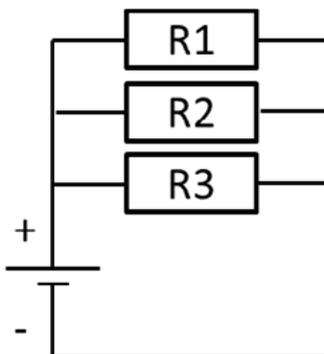


Figure 17. Circuit électrique avec les résistances en parallèle.
R1 : résistance 1, R2 : résistance 2, R3 : résistance 3

Lorsqu'il n'y a que deux résistances en parallèle, la résistance équivalente peut être écrite selon l'Équation 6. Cette équation est valable uniquement pour deux résistances.

$$Req = \frac{R1 \times R2}{R1 + R2} \tag{Équation 6}$$

Si le circuit de l'engin de pêche à l'électricité comporte deux anodes identiques dont les résistances sont Ra1 et Ra2, et une cathode dont la résistance est notée Rc (Figure 18), la résistance équivalente peut être calculée à l'aide de l'Équation 7.

$$Req = \frac{Ra1 \times Ra2}{Ra1 + Ra2} + Rc \tag{Équation 7}$$

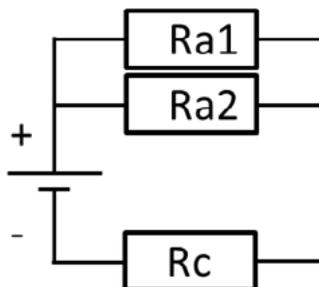


Figure 18. Circuit électrique d'une configuration avec deux anodes identiques en parallèle et une cathode.
Ra1 : résistance de l'anode 1, Ra2 : résistance de l'anode 2, Rc : résistance de la cathode

Si le circuit de l'engin de pêche à l'électricité comporte deux anodes identiques dont les résistances sont R_{a1} et R_{a2} et deux cathodes identiques dont les résistances sont notées R_{c1} et R_{c2} (Figure 19), la résistance équivalente peut être calculée à l'aide de l'Équation 8.

$$R_{eq} = \frac{R_{a1} \times R_{a2}}{R_{a1} + R_{a2}} + \frac{R_{c1} \times R_{c2}}{R_{c1} + R_{c2}} \quad \text{Équation 8}$$

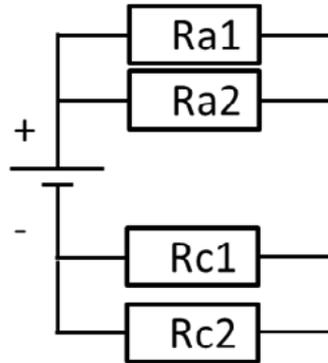


Figure 19. Circuit électrique d'une configuration avec deux anodes identiques en parallèle et deux cathodes identiques en parallèle. R_{a1} : résistance de l'anode 1, R_{a2} : résistance de l'anode 2, R_{c1} : résistance de la cathode 1, R_{c2} : résistance de la cathode 2 (entre R_{a2} et R_{c1})

1.4.2 La conductance et la conductivité de l'eau

Une solution aqueuse est un mélange d'eau (phase liquide) et d'éléments chimiques dissouts (soluté). La conductance d'une solution, notée G et exprimée en siemens (S), est sa capacité à laisser passer le courant, elle est donc l'inverse de la résistance (Équation 9). L'ancienne unité de la conductance était appelée mho, l'inverse d'ohm.

$$G = \frac{1}{R} \quad \text{Équation 9}$$

Grâce à la loi d'Ohm, la conductance peut être calculée autrement (Équation 10):

$$G = \frac{I}{U} \quad \text{Équation 10}$$

La conductivité électrique est la capacité d'un volume de matière à conduire l'électricité, elle est exprimée en $\mu S.cm^{-1}$ car toutes les sondes de mesures sont calibrées avec un volume de mesure de $1 cm^3$. La valeur de la conductivité d'une eau dépend de la concentration et de la mobilité des ions, de la valence des ions, de la température, etc.

En général, pour être comparables entre elles, les mesures de conductivité sont ramenées à une température spécifique de référence, le plus souvent de $20^\circ C$ ou $25^\circ C$: on appelle cela la conductivité spécifique (notée K). En pêche à l'électricité il est plus intéressant de mesurer la conductivité ambiante (notée $C_{amb(t)}$) qui prend en compte la température de l'eau. La conductivité ambiante peut être calculée en fonction de la température de référence de $25^\circ C$ grâce à l'Équation 11 (Mackereth *et al.*, 1978).

$$C_{amb(t)} = \frac{K}{1,023^{(25-t)}} \quad \text{Équation 11}$$

En France, 75 % des cours d'eau prospectés en 2009-2010 par l'Onema (maintenant OFB) avaient une conductivité se situant entre 100 et $600 \mu S.cm^{-1}$ et plus de 90 % avait une conductivité spécifique entre 50 et $700 \mu S.cm^{-1}$ (Marchand *et al.*, 2013).

1.4.3 Notion de résistance équivalente

En pêche à l'électricité, les anodes et les cathodes sont faites de métaux conducteurs tels que l'acier inoxydable, l'aluminium ou le cuivre. Ces électrodes sont connectées au transformateur à l'aide de câbles en cuivre dont la résistance est relativement très faible comparée à celle des électrodes. L'Équation 12 permet de mesurer la résistance

d'un câble électrique, avec R (Ω) la résistance du fil de section S (m^2) et de longueur l (m) fait d'un matériau de résistivité ρ ($\Omega \cdot m$). Par exemple, la résistance d'un fil de cuivre de $2,5 \text{ mm}^2$ de section et de 20 mètres de longueur est égale à :

$$R = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \times 20}{2,5 \times 10^{-6}} = 0,14 \Omega.$$

Si les électrodes sont directement intégrées dans le circuit et reliées entre elles, la résistance totale du circuit dépasse rarement 1Ω dans l'air.

$$R = \frac{\rho \times l}{S} \quad \text{Équation 12}$$

En réalité les électrodes sont plongées dans une masse d'eau. La résistance des électrodes va donc dépendre de deux composantes. La première est la résistance des électrodes dans l'air. La seconde prend en compte la résistance de l'eau, l'espacement des électrodes et la forme des électrodes (dimension et géométrie).

La résistance des électrodes dans l'eau a donc une valeur supérieure à celle des électrodes dans l'air. La « résistance équivalente » d'une électrode est le terme qui prend en compte la masse d'eau dans le circuit électrique. Elle est notée R_{eqA} pour celle de l'anode et R_{eqC} pour celle de la cathode. Le terme « résistance équivalente totale » caractérise donc la résistance totale du circuit lors d'une pêche à l'électricité c'est-à-dire la somme de R_{eqA} et de R_{eqC} .

L'orientation des électrodes dans l'eau n'a pas d'effet majeur sur la valeur de résistance équivalente. Par contre la position des électrodes (proches des berges, de la surface, du fond de la masse d'eau) peut influencer leur résistance équivalente.

1.4.4 Mesurer la résistance équivalente des électrodes

Une électrode

Il est possible d'obtenir la valeur de résistances à l'aide de formules théoriques (Cuinat, 1968; Novotny et Priegel, 1974) ou à partir de formules empiriques (Beaumont *et al.*, 2005; Kolz, 1993) construites à partir de données acquises sur le terrain.

Cuinat (1968) a proposé une formule capable de déterminer la résistance d'électrodes ayant une forme hémisphérique tandis que Novotny et Priegel (1974) ont proposé des formules pour des électrodes sphériques, cylindriques, en forme d'anneau, de plateau ou de disque. Beaumont *et al.* (2003), Kolz (1993) et Pottier *et al.* (2014) ont mesuré *in situ* des valeurs de résistance équivalente de différents diamètres d'anodes en forme d'anneau et de différents modèles de cathodes. De ses mesures empiriques, Beaumont *et al.* (2005) ont créé une formule capable d'estimer la résistance équivalente d'une anode en fonction de son diamètre.

Reynolds (2016) a analysé l'influence de la forme (sphère, anneau ou barre) et du diamètre de la section transversale sur la résistance du système selon les équations de Novotny et Priegel (1974) et en fonction de valeurs empiriques. La forme de l'électrode a un effet 9 fois plus important que celui du diamètre de sa section transversale sur la résistance du système. Dans le même sens Beaumont *et al.* (2005) ont trouvé que le fait de varier le diamètre de la section transversale a un effet minimal avec une différence maximale de 15 % sur les valeurs des résistances.

Les formules théoriques sont moins précises dans des milieux naturels car elles ne prennent pas en compte l'effet de bordure créé par le lit de la rivière. Il est important de préciser si les mesures des résistances ont été effectuées à l'écart de berges et du fond de la masse d'eau ou non. Elles peuvent avoir une influence sur la valeur de la résistance équivalente. Les informations empiriques doivent cependant être prises en compte car chaque environnement physique est différent ce qui peut amener à des mesures de résistances différentes.

Les valeurs empiriques des résistances des électrodes peuvent être mesurées pour n'importe quelle forme d'électrode. Pour cela il faut mesurer la résistance équivalente totale du circuit en utilisant deux électrodes identiques. La mesure empirique de l'intensité du courant dans l'eau est la méthode la plus fiable pour obtenir la résistance du système électrique. La résistance équivalente de chaque électrode sera donc la moitié de la résistance équivalente totale. Une fois connue la valeur de la résistance équivalente d'une électrode, il suffit d'en remplacer une par une différente et de mesurer de nouveau la résistance équivalente totale. La résistance inconnue de la seconde électrode est ensuite calculée en soustrayant à la valeur de la résistance équivalente totale de la valeur de la résistance connue de la première électrode.

Par exemple, si la résistance équivalente totale R_{eqtot1} a une valeur de 40Ω , la résistance équivalente de chaque électrode R_{eq1} est de 20Ω . Si une électrode est remplacée par une autre dont sa résistance est inconnue et que la résistance équivalente totale R_{eqtot2} a une valeur de 50Ω , la valeur de la résistance équivalente de la deuxième électrode R_{eq2} sera de 30Ω . Il s'agit de l'application de la loi d'Ohm avec des résistances en séries (Équation 4).

Des valeurs empiriques de résistances équivalentes pour différents modèles d'anodes et de cathodes ont été mesurées (Annexe 1; Beaumont *et al.*, 2005; Kolz, 1993; Pottier *et al.*, 2014; Reynolds, 2016).

PARTIE A. L'ÉLECTRICITÉ

La résistance équivalente d'une électrode n'est pas conditionnée par le courant qui la traverse. Elle varie uniquement en fonction de la conductivité ambiante (Partie 1.4.2). Il existe une relation entre la résistance équivalente R_{eq} d'une électrode et la conductivité ambiante C_{amb} (Équations 13 et 14).

$$R_{eq1} \times C_{amb1} = R_{eq2} \times C_{amb2} \quad \text{Équation 13}$$

Ce qui donne

$$R_{eq2} = \frac{R_{eq1} \times C_{amb1}}{C_{amb2}} \quad \text{Équation 14}$$

Avec R_{eq1} la résistance équivalente de l'électrode dans une eau de conductivité ambiante C_{amb1} et R_{eq2} la résistance équivalente de l'électrode dans une eau de conductivité ambiante C_{amb2} .

Il suffit de connaître la valeur de la résistance équivalente d'une électrode à une conductivité ambiante donnée pour pouvoir la calculer pour d'autres conductivités ambiantes.

Par exemple, pour une conductivité ambiante C_{amb1} de $350 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, une électrode à une résistance équivalente R_{eq1} de 35Ω , sa résistance équivalente R_{eq2} pour une conductivité ambiante C_{amb2} de $500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ sera de :

$$R_{eq2} = \frac{35 \times 350}{500} = 24,5 \Omega.$$

Deux ou plusieurs électrodes

D'après la loi de Kirchoff, le fait d'ajouter une ou plusieurs électrodes va faire varier la résistance équivalente totale. Dans le cas où deux anodes sont utilisées et que la cathode reste inchangée, l'Équation 7 (Partie 1.4.1) est utilisée pour calculer la résistance équivalente totale. Si une cathode est ajoutée pour maintenir la tension à la sortie de l'anode, l'Équation 8 (Partie 1.4.1) est la plus appropriée.

1.5 L'intensité et la densité de courant

L'intensité du courant, noté I , correspond à la quantité et à la vitesse d'électricité qui circule entre les deux électrodes, exprimée en ampères (A). Elle peut être comparée au débit de l'eau dans un tuyau.

L'intensité peut être calculée grâce à l'Équation 15, avec U la tension en volts (V) et R la résistance équivalente du circuit en ohms (Ω). Pour une tension réglée sur un engin de pêche à l'électricité, l'intensité du courant varie donc en fonction de la conductivité.

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{Équation 15}$$

La densité de courant, notée J , est exprimée en $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$. Elle correspond au champ de vecteurs qui associe un vecteur de densité de courant à tout point de ce champ. Autrement dit, il s'agit de la force de l'intensité du courant électrique à un point particulier se trouvant dans l'eau. La densité de courant peut être calculée à l'aide de l'Équation 16, avec E le gradient de tension (V) et C_{amb} ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) la conductivité ambiante de l'eau.

$$J = E \times C_{amb} \quad \text{Équation 16}$$

1.6 La puissance et la densité de puissance

La puissance, notée P , est le produit mathématique de la tension et de l'intensité. Il s'agit de la somme d'énergie dépensée par unité de temps (unité en W ou joules.secondes⁻¹). La puissance peut être calculée de deux manières équivalentes à l'aide des Équations 17 ou 18, avec U (V) la tension, I (A) l'intensité et R_{eqtot} (Ω) la résistance équivalente totale du circuit.

$$P = U \times I \quad \text{Équation 17}$$

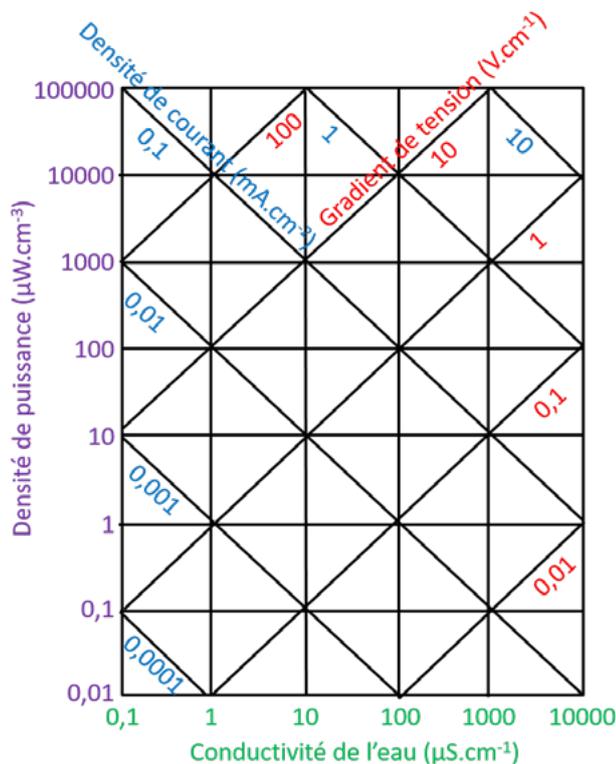
$$P = \frac{U^2}{R_{eqtot}} \quad \text{Équation 18}$$

La densité de puissance, notée D , est la quantité de puissance dissipée par unité de volume entre deux surfaces isopotentielles. De façon similaire à la puissance, la densité de puissance est le produit mathématique du gradient de tension et de la densité de courant, elle est généralement exprimée en $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Équations 19 et 20).

$$D = E \times J \quad \text{Équation 19}$$

Avec D la densité de puissance, C_{amb} la conductivité ambiante de l'eau, J la densité de courant et E le gradient de tension.

$$D = C_{amb} \times E^2 \quad \text{Équation 20}$$



Kolz (1989) a construit un graphe à quatre dimensions (conductivité, densité de courant, densité de puissance et gradient de tension, Figure 20). Chaque point du graphe permet de représenter les valeurs correspondantes de chaque dimension simultanément en ne connaissant que deux dimensions (par exemple le gradient de tension et la conductivité). Il est intéressant de noter qu'à un gradient de tension constant, la densité de courant et la densité de puissance augmentent de façon proportionnelle à la conductivité de l'eau. De plus, à n'importe quel point dont la valeur du gradient de tension est égale à $1 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$, la valeur numérique de la densité de puissance (en $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$) et de la densité de courant (en $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$) est égale à celle de la conductivité de l'eau (en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

Figure 20. Relations entre la densité de puissance (power density), la conductivité de l'eau (water conductivity), le gradient de tension (voltage gradient) et la densité de courant (current density).
mA = milliampère $k=1\,000$ D'après Kolz, 1989.

1.7 L'essentiel à retenir

Pour caractériser un champ électrique dans l'eau, le gradient de tension ($\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$) est mesuré à l'aide d'une sonde Penny.

Deux formes de courant sont généralement utilisées en pêche à l'électricité :

- le courant continu (DC);
- le courant pulsé:
 - crénelé (PDC),
 - exponentiel (PEC),
 - de base sinusoïdale.

Les réglages de la fréquence et du rapport cyclique ont une influence sur la forme du courant pulsé.

La conductivité ambiante de l'eau a une influence sur la résistance équivalente des électrodes, sur l'intensité du courant électrique et la puissance fournie par l'engin de pêche à l'électricité. Plus la conductivité ambiante augmente, plus la résistance équivalente diminue, plus l'intensité et la puissance demandées pour maintenir une même tension augmentent. Pour une même conductivité, si la tension augmente, la demande en puissance augmente. L'intensité et la résistance équivalente restent constantes.



2 L'application de l'électricité dans l'eau: le cas de la pêche à l'électricité

2.1 La création du courant par l'engin de pêche à l'électricité

La Figure 21 explique la création du courant par un appareil de pêche à l'électricité. La phase d'alimentation consiste à l'apport du courant. Cet apport peut provenir d'une batterie qui fournit du courant continu (DC) ou d'un générateur thermique qui produit du courant alternatif (AC). Lorsque le courant provient d'une batterie, le DC est transformé en AC à l'aide d'un onduleur. Cette phase est importante car le convertisseur élévateur de tension ne fonctionne qu'avec des tensions alternatives. Il permet de convertir de basses tensions en hautes. Si le courant est issu d'un générateur AC, il n'a pas besoin d'être transformé par l'onduleur pour arriver au convertisseur élévateur de tension. Ensuite plusieurs options peuvent être choisies. Le courant peut passer directement par un redresseur de tension couplé à un condensateur de filtrage, ce qui permet de créer du DC à partir de l'AC. Ce DC peut être directement exploitable pour générer un champ électrique dans l'eau à partir des électrodes. Le courant peut aussi passer par un convertisseur de fréquences qui permet de modifier la fréquence de l'AC. Dans certains cas (notamment aux USA), cet AC peut être directement exploitable. Si ce n'est pas le cas, le courant subit une transformation supplémentaire grâce à un générateur d'impulsions. Le courant peut subir une ultime transformation en passant par un modulateur qui permet de transformer le spectre du signal (tension, intensité, fréquence, phase). Une fois le courant transformé, il peut être transmis dans les électrodes pour se propager dans l'eau.

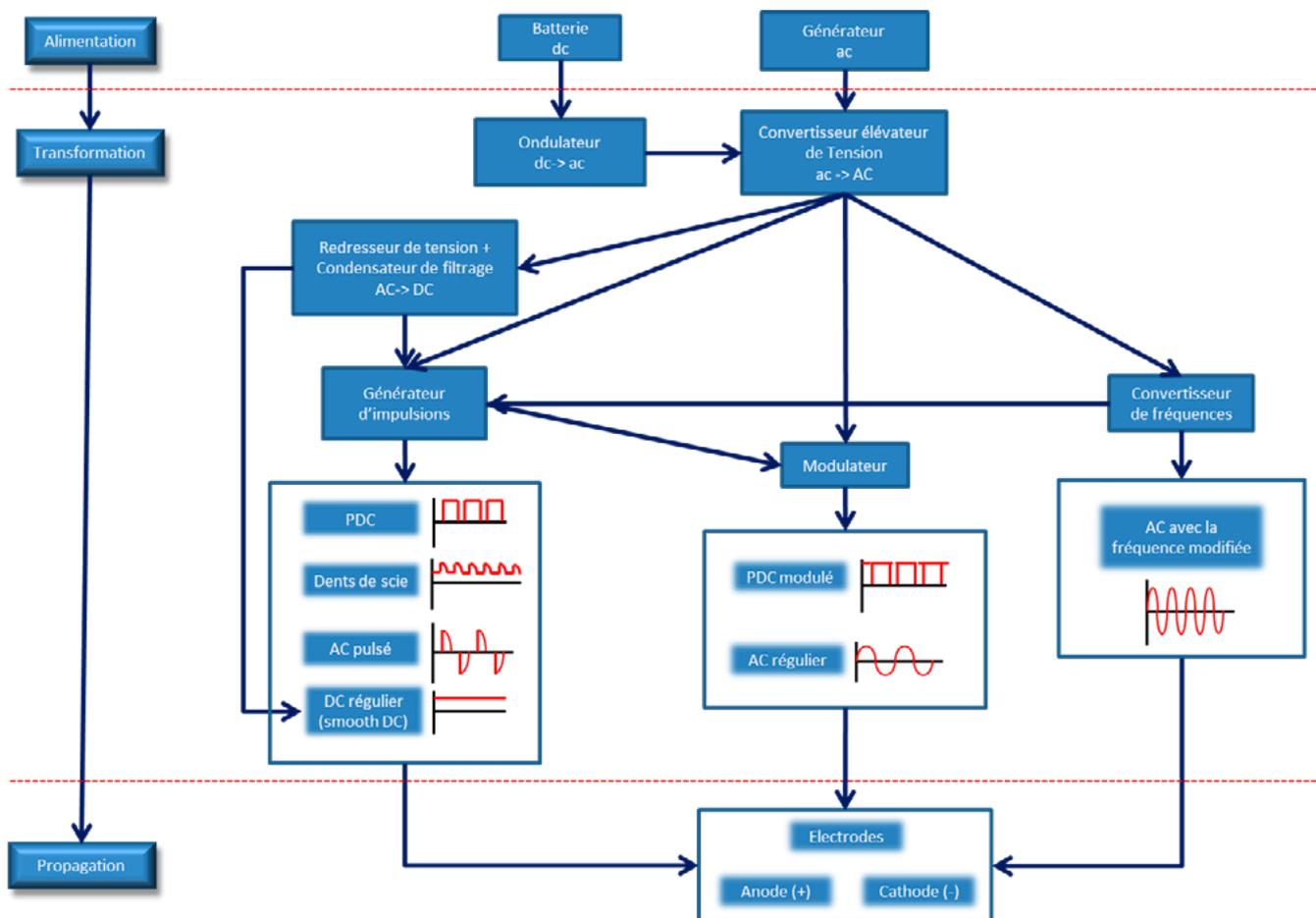


Figure 21. Les principes de la création de différentes formes de courant. AC: courant alternatif, DC: courant continu, PDC: courant pulsé crénelé

2.2 La diffusion du champ électrique dans l'eau

La taille, la forme et la nature du champ électrique sont déterminées par la distribution et le motif du courant électrique. Ce courant électrique est caractérisé par le différentiel de tension, le type de courant, la forme d'onde générée entre et autour des électrodes, la position, la taille et la forme de ces électrodes, la conductivité de l'eau, la nature du milieu environnant et les dimensions du cours d'eau (Beaumont, 2011 ; Beaumont *et al.*, 2006).

Un champ électrique est diffusé dans l'eau entre deux électrodes (anode et cathode). La propagation du courant dans l'eau dépend de la conductivité et de la configuration de l'appareil de pêche à l'électricité (taille de l'anode et de la cathode, type de courant fourni, Beaumont, 2011).

2.2.1 La tension de sortie à l'anode et le gradient de tension

Lorsque les conditions expérimentales sont fixées, le gradient de tension dépend uniquement de la tension de sortie à l'anode (V_a). La tension de sortie à l'anode dépend du ratio de la résistance de l'anode sur celle de la résistance totale du circuit. Ce ratio reste indépendant de la conductivité ambiante.

Le fait de varier les couples anode-cathode a donc un effet sur la valeur de V_a . La loi de Kirchhoff permet de calculer cette valeur (Équation 21).

$$V_a = \frac{R_a}{R_a + R_c} \times U \quad \text{Équation 21}$$

V_a est la tension à l'anode, R_a est la résistance équivalente de l'anode, R_c est la résistance équivalente de la cathode et U est la tension fournie par l'appareil de pêche à l'électricité. Dans le cas présent, la résistance des fils électriques reliant les électrodes au transformateur est considérée comme nulle.

2.2.2 Le rapport cyclique

Miranda et Dolan (2004) ont évalué la densité de puissance nécessaire pour induire le phénomène de tétanie chez plusieurs espèces de poisson. Les seuils de densités de puissance pour immobiliser un individu décroissent avec l'augmentation de la taille du poisson et du rapport cyclique et ils augmentent lorsque le rapport cyclique est en dessous de 10 %. En appliquant un PDC à 100 Hz et en faisant varier le rapport cyclique, Lamarque (1968) avait noté une augmentation du seuil de taxie anodique lorsque le rapport cyclique était inférieur à 10 %. Novotny et Priegel (1974) ont décrit qu'en réglant un PDC à 25 % et 50 %, les résultats obtenus sont similaires mais que le réglage de 10 % induit une efficacité moindre. Miranda et Dolan (2004) suggèrent que l'efficacité de la pêche à l'électricité peut être optimisée si le rapport cyclique est réglé entre 10 % et 50 %.

Le fait d'augmenter le rapport cyclique va également induire une hausse de la puissance nécessaire fournie par l'engin de pêche à l'électricité. Le fait d'exprimer le rapport cyclique en pourcentage permet d'effectuer des calculs de la puissance plus facilement. Par exemple, si le rapport cyclique est réglé à 30 %, pour diminuer la demande en puissance de moitié il faut régler le rapport cyclique à 15 %.

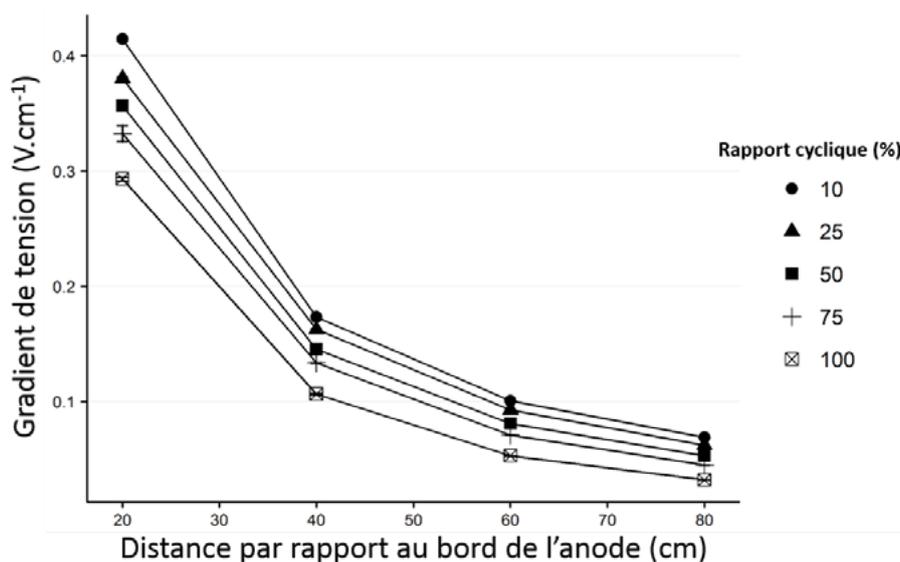


Figure 22. Gradient de tension mesuré à différentes distances à partir du bord de l'anode en fonction du rapport cyclique. Lorsque le rapport cyclique est à 100 % il s'agit de DC. La fréquence a été fixée à 40 Hz et la tension U à 100 V. Barres d'erreur : erreur standard. Source : Pottier *et al.* 2020

2.2.3 La fréquence

Histoire de la fréquence en France

Actuellement en France, les fréquences de 100 Hz et 400 Hz sont largement utilisées lors de pêches avec appareils qui fournissent du PDC. Des réponses à leur utilisation se trouvent dans l'article de Gosset *et al.* (1971) qui ont démontré l'efficacité de la fréquence de 400 Hz notamment pour pêcher les anguilles et les truitelles. Cowx et Lamarque (1990) ont établi une liste des types de courants (AC, DC et PDC) en fonction de leurs effets néfastes sur la faune piscicole. Ces courants ont été testés sur le terrain (Lamarque, 1990b). Cowx et Lamarque (1990) préconisent le courant continu pur comme étant le moins impactant. Cependant l'utilisation de ce type de courant nécessite une grande consommation d'énergie. Afin de limiter la consommation en énergie, le PDC a été préconisé. Lamarque (1976) a noté qu'à 400 Hz et un rapport cyclique de 10 %, le seuil de réaction du poisson se situe à la moitié de celui d'un DC. De plus, avec ce type de courant, l'électrotaxie est bonne et le poisson n'est pas impacté. Le choix d'une haute fréquence combinée avec un faible rapport cyclique permet de conserver de la puissance. « Pour des raisons physiologiques, vérifiées tant au laboratoire que dans la pratique, deux fréquences ont été retenues : 400 et 100 Hz. Quant au rapport cyclique, bien qu'il soit réglable de 10 et 50 % sur les appareils de laboratoire, la valeur de 10 % peut être préconisée pour l'anguille » (Lamarque, 1976a). De plus, Lamarque *et al.* (1975) soulignent l'importance d'utiliser des fréquences élevées qui produisent une excitabilité voisine de celle du courant continu. C'est cette raison qui a guidé vers le choix d'un PDC à une fréquence de 400 Hz pour la pêche dans les eaux tempérées. Cependant dans les eaux tropicales chaudes (température supérieure à 20°C), cette fréquence était inefficace. Ils ont donc exploité la fréquence de 100 Hz (Lamarque *et al.*, 1975). Lamarque *et al.* (1975) ont cependant fait remarquer « qu'en dépit de cette valeur optimale de fréquence, il n'est pas certain qu'on ait intérêt à l'employer dans la pêche ».

Enfin d'après Nicole Charlon (communication personnelle, 2014), anciennement collègue de travail de Lamarque, les fréquences ont été choisies au préalable empiriquement, sans une réelle preuve qu'il en existe de plus ou moins efficaces. « Les premières mises au point du Martin-pêcheur® ne se faisaient pas dans des bassins ou des aquariums mais directement en rivière avec la technique essai et erreur ». Ses propos corroborent ceux de Lamarque *et al.* (1975) qui citent que le choix des fréquences résulte de leurs expériences à Madagascar et en Zambie et qu'il n'est pas souhaitable d'utiliser une fréquence de 400 Hz dans les eaux chaudes, une fréquence de 60 Hz et mieux de 100 Hz (Lamarque, 1968) étant préférable.

Influence de la fréquence sur la puissance

Si le rapport cyclique est exprimé sur une base de seconde (le plus souvent en ms) et non sur une base de pourcentage, la fréquence peut avoir un effet sur la puissance (Figure 23). En effet, lorsque la fréquence augmente et que la durée du rapport cyclique reste la même, la puissance utilisée va augmenter (Figure 24).

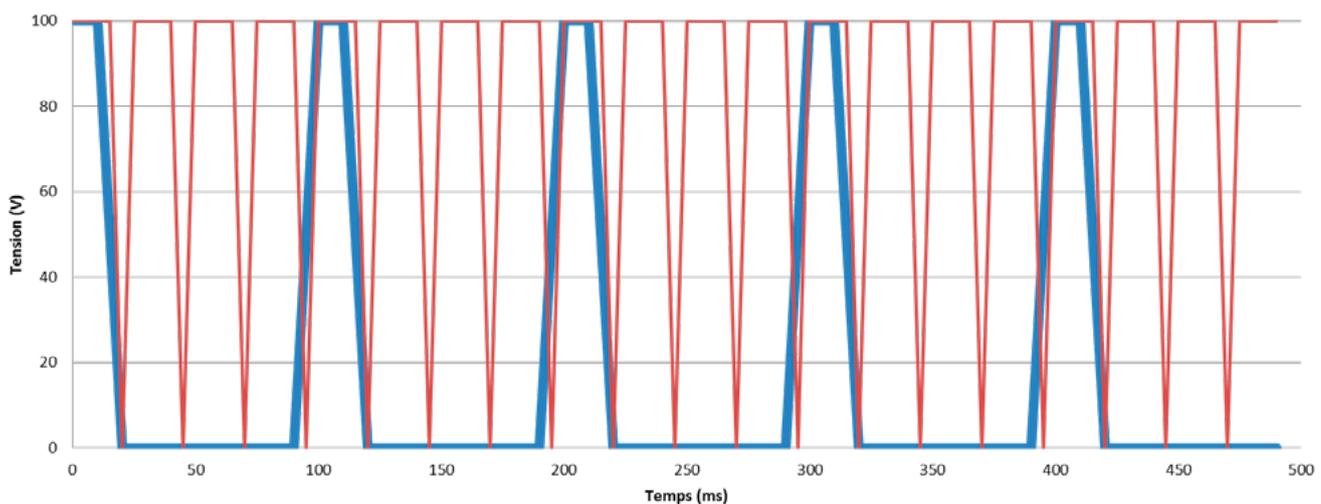
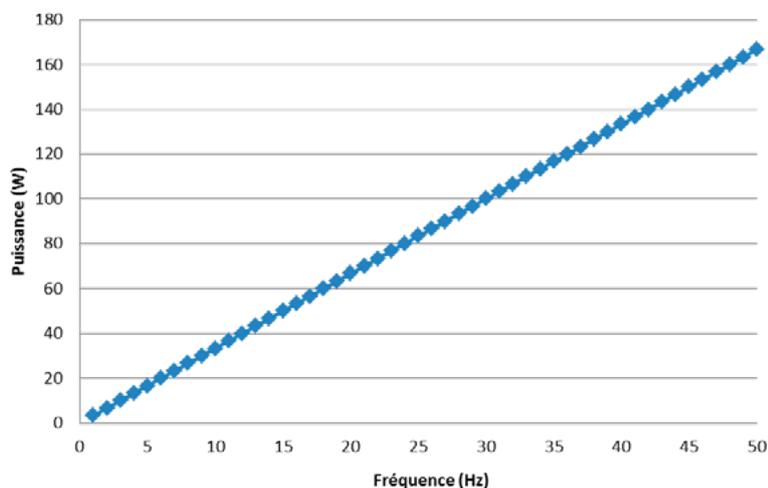


Figure 23. Effet de l'augmentation de la fréquence sur le courant avec un rapport cyclique constant de 20 ms et un pic de tension de 100 V.

Avec l'arrivée de nouveaux matériels dotés d'une technologie récente, il est possible de régler la fréquence par pas de 1 Hz pour certains modèles. Des rafales de PDC (*gated burst PDC* en anglais), autrement appelées Systèmes complexes de pulsations (*CPS* en anglais), sont également disponibles sur certains modèles récents. Cette forme de courant nécessite le réglage de deux fréquences : une pour le motif de la rafale et l'autre pour les pulsations au sein de la rafale.

Figure 24. Effet de l'augmentation de la fréquence sur la demande de puissance d'un engin de pêche à l'électricité, pour un rapport cyclique constant de 20 ms. Le pic de tension est de 100 V et la résistance équivalente totale est de 60 Ω .



2.3 Les électrodes

2.3.1 L'anode

L'utilisation de l'anode

L'anode en forme d'anneau est communément utilisée. Elle permet de produire un champ électrique uniforme de la même forme que l'anneau utilisé.

Le diamètre de l'anneau est le facteur le plus important qui affecte la résistance équivalente de l'anode (Beaumont *et al.*, 2005), qui elle-même affecte directement la taille du champ électrique.

(Beaumont, 2011) suggère d'utiliser l'anode la plus grande possible selon la largeur du cours d'eau et la conductivité ambiante du cours d'eau. En effet, si la puissance de l'appareil le permet, il est possible d'augmenter le diamètre de l'anode et donc d'augmenter la tension fournie par l'engin de pêche afin d'avoir un rayon d'attraction équivalent et une zone de tétanie réduite.

Il n'est pas recommandé d'immerger partiellement l'anode car cela induit une augmentation du gradient de tension. Beaumont *et al.* (2002) ont mesuré le gradient de tension à 60 cm d'une anode en faisant varier le pourcentage d'immersion de cette électrode (Tableau 1). Il s'avère que le gradient de tension est 150 % supérieur lorsque l'anode est immergée à 25 % comparé au gradient de tension lorsque l'anode est immergée à 100 %.

Plus le diamètre de l'anode augmente, plus sa résistance diminue. Cela implique donc une augmentation de la puissance requise pour fournir une même tension de sortie à l'anode.

Il faut donc choisir l'anode en fonction de la puissance que l'engin de pêche est capable de fournir et la largeur du cours d'eau.

Tableau 1. Gradients de tension autour de l'anode selon le pourcentage d'immersion de l'anode (Beaumont *et al.*, 2002)

Pourcentage immergé	Gradient de tension ($V.cm^{-1}$) à 60 cm
100 %	0,95
50 %	0,90
25 %	1,45

La qualité de l'anode

La qualité de l'anode a un impact sur la dispersion du champ électrique. Pottier *et al.* (2015) ont utilisé 4 anodes en aluminium de qualités différentes (Très Bonne, Bonne, Moyenne et Mauvaise) selon leur degré d'oxydation (Figure 25). Ils ont mesuré les distances à l'anode de gradients de tension de $0,1 \text{ V.cm}^{-1}$ pour évaluer le possible impact de l'usure des anodes sur la dispersion du courant.

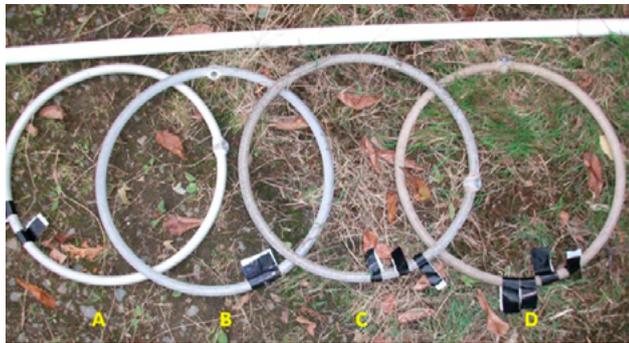


Figure 25. Anodes utilisées pour tester l'influence du degré d'oxydation sur la dispersion du champ électrique. Les anodes sont positionnées selon leur qualité liée au degré d'oxydation :
 A: Très Bonne
 B: Bonne
 C: Moyenne
 D: Mauvaise

La distance à l'anode du gradient de tension de $0,1 \text{ V.cm}^{-1}$ augmente en fonction de la tension (Figure 26). Plus la qualité de l'anode se dégrade, plus la distance du gradient de tension de $0,1 \text{ V.cm}^{-1}$ diminue. Une anode de mauvaise qualité induit une perte moyenne de 11,31 % de la distance du gradient de $0,1 \text{ V.cm}^{-1}$, en comparaison avec l'utilisation d'une anode de très bonne qualité. D'autre part, enrouler la cathode sur elle-même induit une perte moyenne de 15,96 % de la distance du gradient de $0,1 \text{ V.cm}^{-1}$ par rapport au moment où elle est bien étalée. Enfin si les deux conditions (mauvaise qualité d'anode + cathode entortillée) sont réunies, elles induisent une baisse de 25,46 % par rapport à de bonnes conditions (très bonne ou bonne anode + cathode bien étalée). L'oxyde d'aluminium est un isolant électrique. Les couches de cet oxyde peuvent induire une isolation partielle de l'anode. Par conséquent le courant peut ne pas traverser ces couches ce qui induirait une réduction du champ électrique.

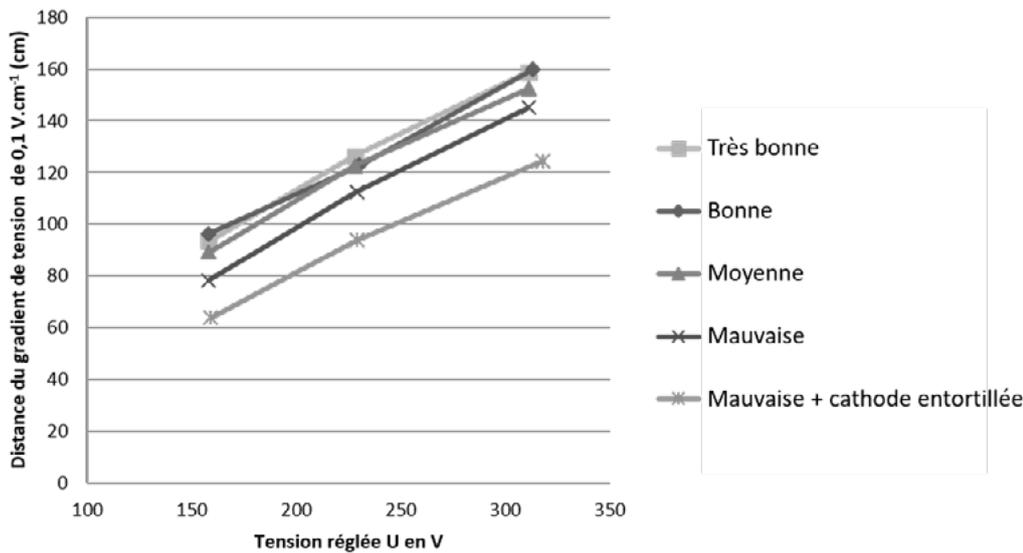


Figure 26. Variation de la distance des gradients de tension de $0,1 \text{ V.cm}^{-1}$ en fonction de la tension fournie (DC) par l'appareil U et de la qualité des anodes en fonction de leur degré d'oxydation et de l'entortillement de la cathode. Source: Pottier *et al.* (2015).

L'utilisation de 2 anodes

Lorsque deux anodes sont utilisées simultanément, la résistance équivalente associée à ces deux électrodes diminue du fait de leur proximité. La puissance fournie par l'appareil sera donc supérieure pour maintenir une même tension à l'anode. Dans cette configuration, le profil du gradient de tension de chaque anode peut être altéré. Pour une tension fixe réglée sur un engin de pêche à l'électricité, Beaumont *et al.* (2006) ont aussi démontré que lorsque la distance de séparation des anodes diminue, le gradient de tension diminue plus fortement lorsqu'on s'éloigne de l'anode (Figure 27). Lors d'une pêche avec deux anodes, une attention doit être portée sur le fait de garder les deux anodes suffisamment à l'écart pour qu'elles n'interagissent pas ensemble.

Lorsque deux anodes identiques sont intégrées en parallèle dans le circuit électrique, la résistance équivalente des deux anodes placées est divisée par deux. En théorie, selon la loi de Kirchhoff, la tension V_a au niveau de ces deux anodes devrait diminuer. Cependant Pottier *et al.* (2014) ont observé qu'une anode ne fournit pas de champ électrique plus important que deux bonnes anodes associées en parallèle sur l'appareil de pêche. Un même gradient de tension est observé à la sortie des deux anodes car l'appareil de pêche rehausse l'intensité du courant pour conserver une même tension de sortie.

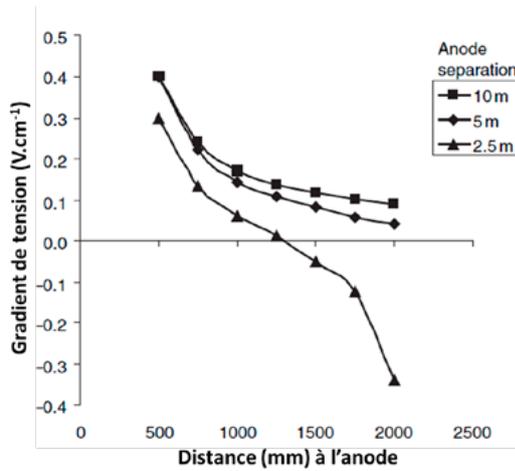


Figure 27. Effet de la distance de séparation de deux anodes utilisées simultanément sur le gradient de tension. Le circuit est composé de deux anodes en forme d'anneau de 40 cm de diamètre et de 1 cm de section transversale et d'une cathode en tresse de 3 m. Tension du circuit = 200 V
Tension à l'anode $V_a = 114$ V
N.B. Les valeurs en négatif sont le résultat de la polarité du gradient de tension qui change car la cathode était située entre les deux anodes. D'après Beaumont *et al.*, 2006.

La forme de l'anode

La performance du champ électrique provenant de l'anode peut être altérée par la configuration physique de l'anode. Il existe des anodes plates qui sont faites à partir d'une maille élargie en guise de tube, d'autres de formes triangulaires ou carrées. Une grande sphère de métal en tant qu'anode serait la forme idéale pour distribuer le gradient de tension dans toutes les directions uniformément. Cependant cette forme n'est pas aisée à manipuler à une seule main du fait de son poids. La forme d'anneau circulaire permet donc de pallier ce problème. Un des avantages de cette forme est que le champ électrique qui en sort prend une forme similaire et se répand de façon homogène autour de l'anode.

Pour une simplicité de compréhension, la Figure 28 présente la dispersion du gradient de tension dans l'eau en deux dimensions alors qu'elle s'effectue normalement en trois dimensions.

Si des électrodes avec des angles (par exemple rectangulaires ou triangulaires) sont utilisées, les gradients de tension projetés par les côtés seront suffisants pour produire une narcose sur le poisson mais des gradients de tension plus forts vont provenir des angles, et peuvent impacter les poissons. Similairement, les formes cylindriques vont émettre des gradients de tension potentiellement dommageables au niveau des bases (Figure 28).

La Figure 29 présente le gradient de tension mesurée autour d'une anode triangulaire. Il augmente considérablement au niveau de l'angle.

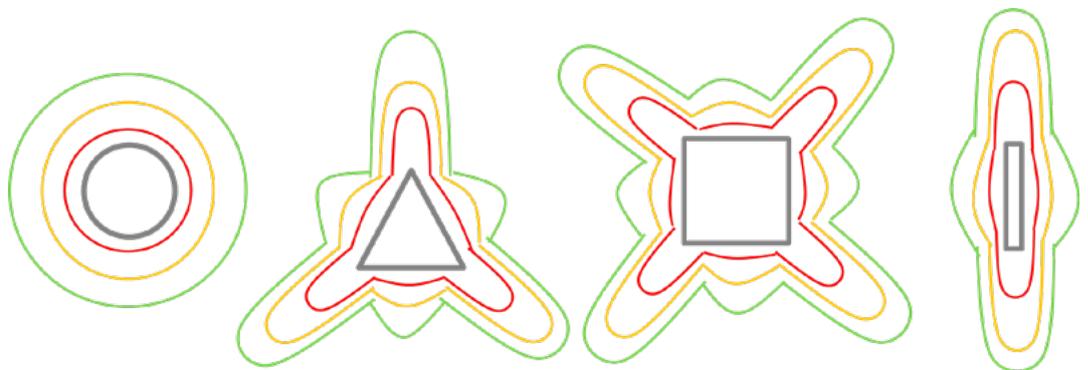


Figure 28. Modèles schématiques de la dispersion du gradient de tension à partir de différentes formes d'anodes (ronde, triangulaire, carrée et cylindrique).

Gris: Anode

Rouge: Fort gradient de tension

Orange: Moyen gradient de tension

Vert: Faible gradient de tension

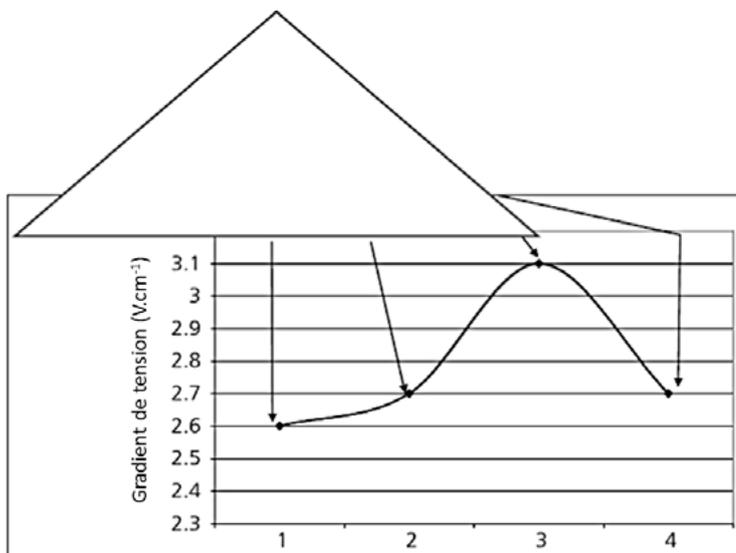


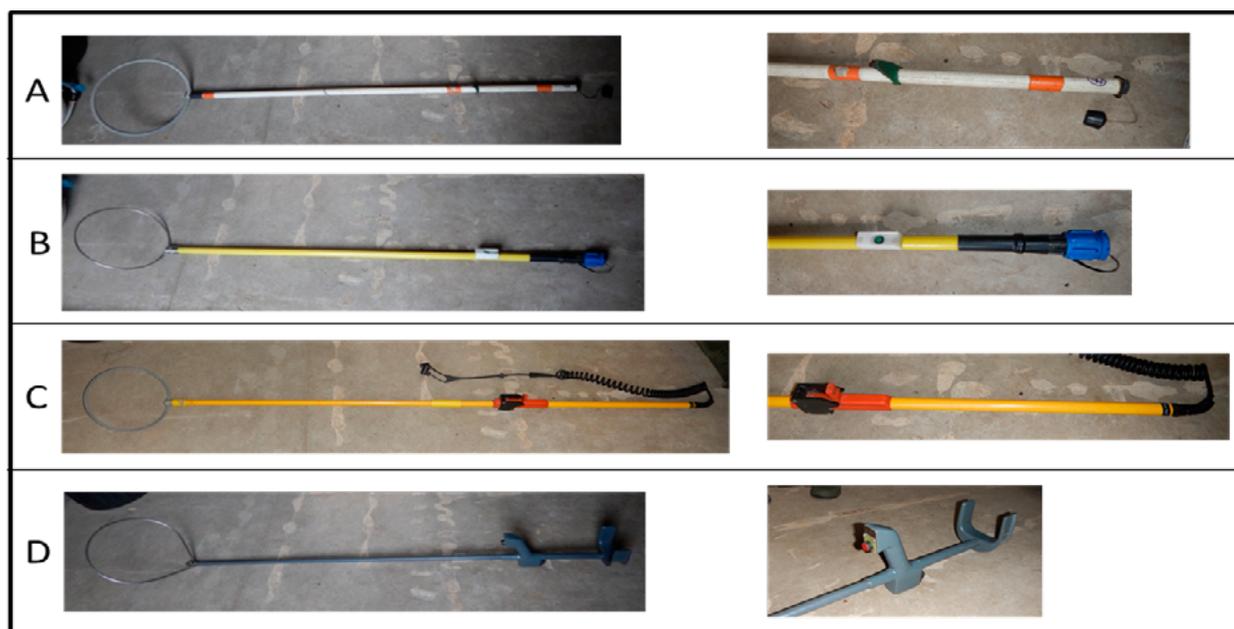
Figure 29. Gradient de tension mesuré autour d'une anode triangulaire. D'après Beaumont et al., 2006.

Ergonomie des manches d'anode

L'ergonomie des manches d'anodes n'affecte pas la diffusion du champ électrique comme le fait la forme de l'anode. La forme des manches d'anode va avoir un effet sur la facilité et le confort d'utilisation. Le fait d'utiliser un manche peu maniable et lourd va augmenter l'effort fourni par le manipulateur et induire une tension au niveau du bras et du poignet qui peut potentiellement blesser l'opérateur.

Certains modèles du passé étaient conçus à l'aide d'un manche droit et une anode circulaire fixée dans l'axe sans former d'angle obtus. Par la suite, l'apparition d'une anode formant un angle avec le manche a permis d'augmenter le confort lors des manipulations. Récemment, des modifications sont ajoutées au niveau de la prise en main. Certains manches « basiques » possèdent un interrupteur sur le manche avec aucune prise spécifique pour la main (Figure 30 A et B). D'autres proposent un positionnement pour le pouce (Figure 30 C). Les designs les plus « évolués » permettent une prise en main plus naturelle à l'aide d'un « joystick » fixé sur le manche qui comporte l'interrupteur et un repose-coude permettant au poignet de se reposer (Figure 30 D). Ces derniers modèles en matériaux composites deviennent plus légers que les anciens en conservant une certaine robustesse.

Les manches d'anodes doivent être constitués d'un matériel isolant l'électricité et les connections doivent permettre de laisser l'électricité circuler tout en empêchant le contact de l'eau lorsqu'elles sont immergées.



© Gaëtan Pottier - INRAE

Figure 30. Exemples des différents modèles de manches porteurs d'anode. A: modèle créé par Dream Electronique, B: modèle créé par Hans Grassl, C: modèle créé par Smith-Root, D: modèle créé par Hans Grassl

2.3.2 La cathode

Dans la pratique, l'importance de la cathode est souvent négligée. La forme de la cathode joue un rôle sur la valeur de sa résistance équivalente et donc va influencer la tension à la sortie de l'anode V_a (Équation 21, partie 3.2). Si la cathode est trop petite, sa résistance va être élevée et donc un champ intense va être produit autour d'elle, ce qui va défavorablement affecter les poissons. La tension de sortie à l'anode s'en verra aussi réduite.

De plus, la puissance fournie sera utilisée de manière inefficace car pour créer un champ d'attraction suffisant, il faudra apporter plus de puissance dans le circuit créé par l'anode et la cathode.

Cuinat (1968) a trouvé que si la taille de la cathode double, sa résistance diminue de moitié. Dans un même sens, Beaumont *et al.* (2005) ont trouvé que lorsque la taille des cathodes faites de cuivre tressé double, leur résistance diminue d'environ un tiers.

Cependant, du fait du large panel de formes et de différentes tailles de cathodes, il n'est pas possible d'établir un modèle pour prédire efficacement la résistance d'une cathode. Le meilleur moyen reste de la mesurer.

Lors de l'ajout d'une anode supplémentaire, il est fortement conseillé de rajouter une cathode complémentaire au circuit afin de rééquilibrer le ratio R_a/R_c .

Pour créer un champ relativement efficace, c'est-à-dire que la valeur de la tension sortant à l'anode (V_a) corresponde à environ 67 % de celle qui lui est fournie (U), il faut un ratio des résistances R_a/R_c d'environ de 2.

Il existe plusieurs modèles de cathodes sur le marché. La tendance actuelle est d'utiliser une tresse de cuivre plutôt qu'une plaque de métal (Figure 31 A). La tresse a des avantages ergonomiques par rapport à une plaque de métal, notamment dans la facilité de transport. Le câble d'acier inoxydable s'avère également pratique à utiliser (Figure 31 B).

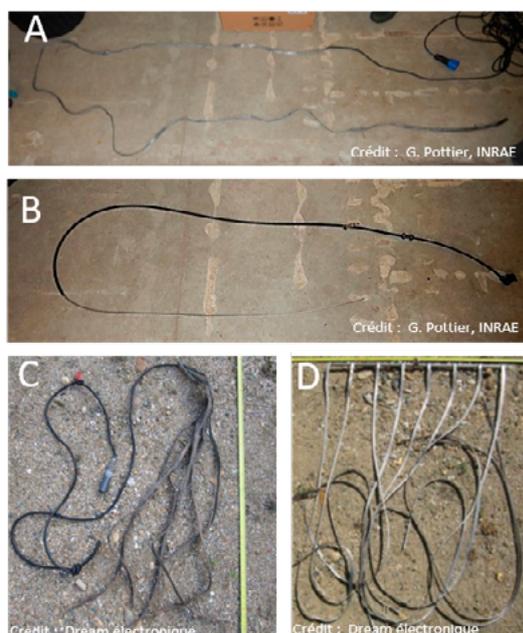


Figure 31. Exemples de différentes formes de cathodes.

A: tresse de cuivre créée par Hans Grassl

B: câble en acier inoxydable créé par Smith-Root

C: assemblage de tresses de cuivres créé par Dream Electronique

D: assemblage de tresses de cuivre soudées à une tige en métal créé par Dream Electronique

Il existe plusieurs modèles de cathodes sur le marché. La tendance actuelle est d'utiliser une tresse de cuivre plutôt qu'une plaque de métal (Figure 31 A). La tresse a des avantages ergonomiques par rapport à une plaque de métal, notamment dans la facilité de transport. Le câble d'acier inoxydable s'avère également pratique à utiliser (Figure 31 B).

Certains constructeurs proposent des cathodes formées de plusieurs tresses de cuivre (Figure 31 C et D). L'intérêt est d'augmenter la surface de contact avec l'eau et donc de diminuer la résistance équivalente. L'idée est intéressante mais en pratique ces tresses ont tendance à se coller entre elles, formant à terme une grosse tresse unique. La surface de contact est réduite et donc la résistance équivalente de la cathode augmente. Ce type de cathode ne permet donc pas de garder un champ électrique constant.

Lors de l'utilisation d'engins portatifs, la taille de la cathode doit être réduite pour éviter qu'elle s'accroche à des obstacles (racines, rochers), afin de faciliter la mobilité du porteur. Le câble doit être suffisamment grand pour permettre à la cathode d'être immergée complètement dans l'eau mais suffisamment court pour permettre à l'opérateur de se déplacer facilement, et pour des raisons de sécurité des opérateurs qui suivent le porteur d'anode.

Si le substrat d'un cours d'eau est très conducteur, il peut changer considérablement la valeur de la résistance équivalente et influencer la répartition du courant entre l'anode et la cathode. Dans ces conditions, il est nécessaire d'utiliser une cathode qui ne soit pas en contact avec le substrat ou de faire en sorte que la cathode qui était initialement en contact avec lui ne le soit plus.

Pour pallier ce problème, il existe des cathodes flottantes (Figure 32). Le design de la cathode représentée dans la Figure 32A n'est pas recommandée du fait que la partie supérieure n'est pas en contact avec l'eau. Cela pose des problèmes en termes de résistance équivalente de la cathode et de sécurité avec un risque de contact direct avec la source d'électricité. Une bonne alternative est l'utilisation d'un flotteur qui maintient la cathode totalement

immergée. Par exemple, la Figure 32B montre une cathode qui est fabriquée à l'aide d'un tuyau scellé faisant office de flotteur avec une tresse de cuivre qui est fixée dessous. Cela permet de garder la cathode totalement immergée et de pouvoir la tracter facilement.

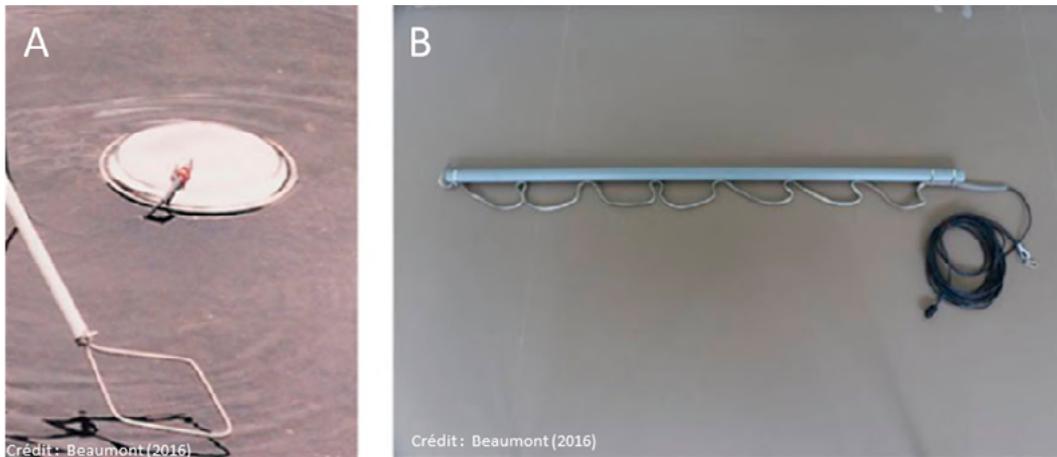


Figure 32. Exemples de cathodes flottantes.

2.4 La puissance requise

2.4.1 La puissance de sortie

La puissance qu'est capable de délivrer un engin de pêche à l'électricité va conditionner la plage de conductivité où il sera utilisable. La puissance dépend de la tension et de la résistance équivalente totale du circuit. La puissance nécessaire pour alimenter le système de pêche à l'électricité peut être estimée pour une conductivité connue, et pour une tension de sortie voulue (Figure 33). Par exemple si la résistance équivalente totale du circuit est de 210 Ω pour une conductivité ambiante de 100 μS.cm⁻¹, pour appliquer un courant continu avec une tension de 200 V DC, la puissance requise sera de 190 W. Par contre, si la conductivité ambiante est de 1 000 μS.cm⁻¹, la résistance équivalente du circuit est de 21 Ω et donc pour appliquer une même tension, la puissance requise sera de 1 905 W.

D'un autre angle de vue, si un engin de pêche à l'électricité peut délivrer une puissance maximale de 1 500 W, et si la tension maximale requise est de 250 V DC, la conductivité maximale d'utilisation de cet engin sera de 504 μS.cm⁻¹.

Lors de l'utilisation de PDC, la puissance de sortie nécessaire est réduite en fonction du rapport cyclique de la forme du courant. Sur le terrain, la puissance de sortie nécessaire peut différer de la valeur théorique en fonction de la conductivité du lit du cours d'eau ou de la variation de l'espacement de l'anode et de la cathode (ou des différentes anodes lorsque c'est le cas).

La profondeur et la largeur du cours d'eau n'ont pas d'influence sur la puissance requise dans le cas où le nombre et la taille des électrodes restent les mêmes.

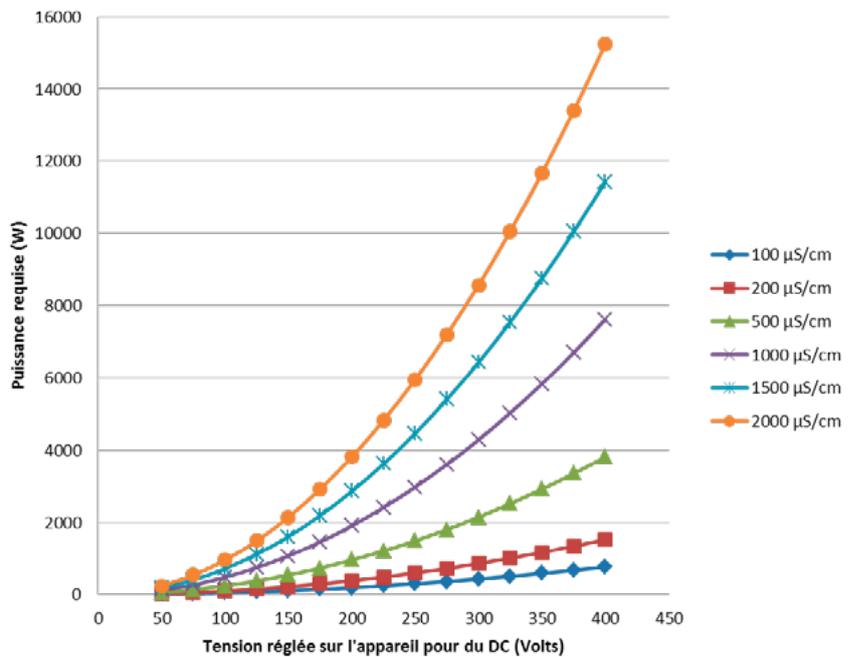


Figure 33. Puissance de sortie requise (W) en fonction de la tension réglée sur un engin de pêche à l'électricité. La résistance équivalente du circuit est de 60 Ω à 350 μS.cm⁻¹.

2.4.2 Le facteur de puissance

Si l'engin de pêche à l'électricité est alimenté par un générateur produisant du courant alternatif, la puissance (en volts.ampères, notée VA) qui est créée doit être supérieure à celle qui sera convertie en DC ou PDC (en W). Le facteur de puissance (noté PF) rend compte de l'efficacité du courant alternatif à transférer la puissance dans l'autre forme de courant. Beaumont *et al.* (2005) ont calculé la valeur du PF à 0,6. La conversion de la puissance fournie par le générateur (en VA) en puissance de sortie de l'engin de pêche à l'électricité est notée dans l'Équation 22.

$$P_{\text{sortie}} = 0,6 \times P_{\text{générateur}} \quad \text{Équation 22}$$

2.5 Le champ électrique fourni par quelques appareils de pêche à l'électricité

Les appareils de pêche à l'électricité analysés par Pottier *et al.* (2015) proposent tous un type et une gamme de courant différents (Annexe 2, partie 15.2).

Ce courant analysé hors eau a des répercussions sur la dispersion du courant dans l'eau. En effet les appareils non portatifs présentant une forte puissance (comme le Héron® de Dream Electronique avec 4 kVA) peuvent créer un champ d'attraction avec un mètre de rayon supplémentaire aux engins portatifs (Figure 34). Les appareils portatifs fournissant du PDC (comme le LR-24 Smith Root et le Martin-pêcheur® Dream Electronique) proposent un champ d'attraction relativement grand comparé à un appareil portatif thermique comme l'ELT60II Hans Grassl (Figure 34). Néanmoins ce type de courant induit une zone de tétanie qui peut être très importante. Le rapport du rayon d'attraction sur le rayon de tétanie est plus faible dans le cas du PDC que du DC (Figure 34).

En fonction des gammes des champs d'attraction proposées par les différents engins de pêche à l'électricité, il est possible de sélectionner le plus adapté selon le secteur de pêche.

Figure 34. Plages de la distance du rayon d'attraction (A) et du rayon de tétanie (B) qui peuvent être fournies par différents engins de pêche à l'électricité.

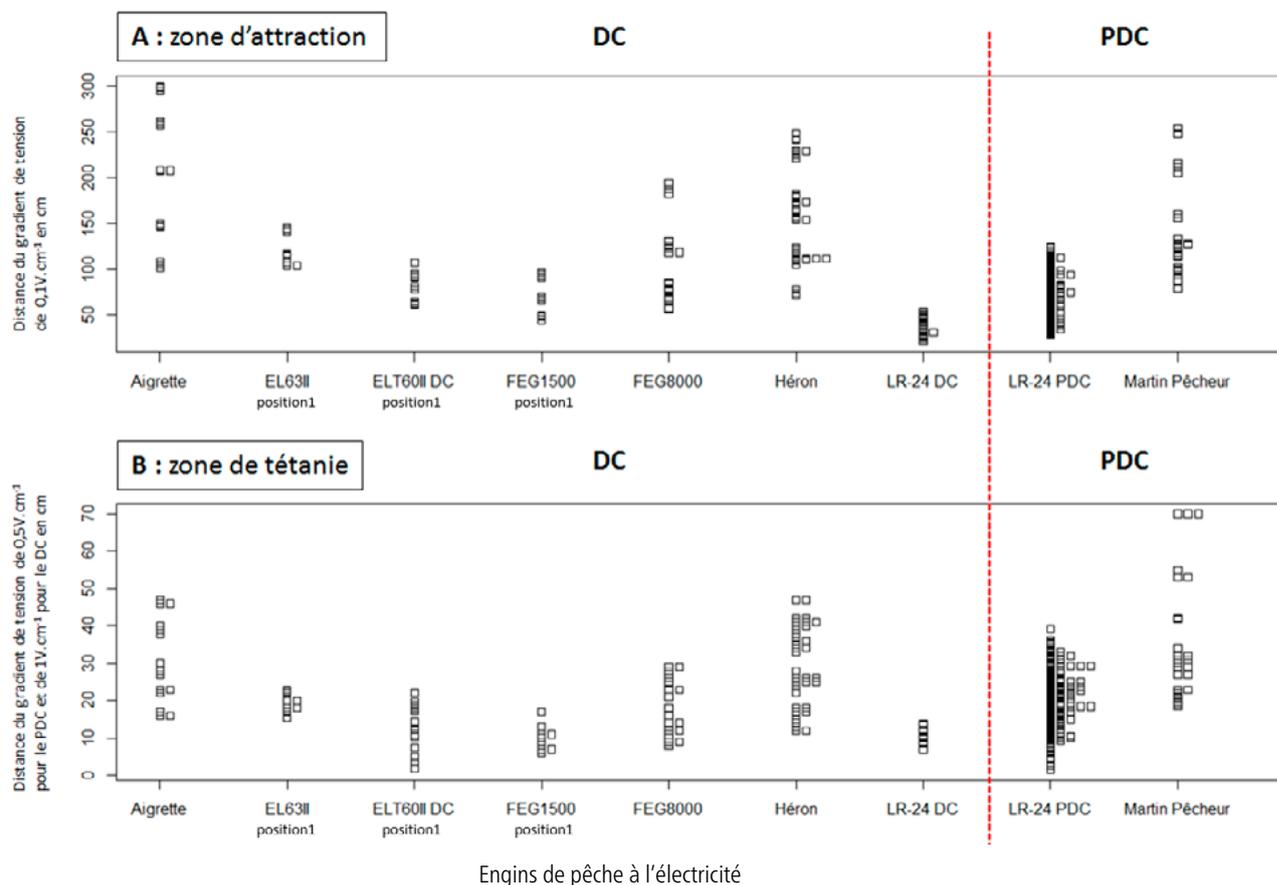
DC: Courant continu

PDC: Courant continu pulsé

Source: Pottier *et al.* (2015).

Beaumont *et al.* (2006) et Pottier *et al.* (2015) ont modélisé la dispersion du gradient de tension en fonction des caractéristiques de pêche et en conditions de pêche à l'électricité pour faciliter un bon réglage de la tension lors des pêches à l'électricité. Cependant Pottier *et al.* (2015) n'ont pas trouvé d'influence du diamètre de l'anode sur la dispersion du champ électrique. En effet Beaumont *et al.* (2006) ont pris comme origine du champ le centre de l'anode alors que Pottier *et al.* (2015) ont pris comme référence le bord de l'anode.

Les modèles ont été créés pour chaque type d'appareil (portatif et non portatif), ils sont présents dans le Tableau 2.



PARTIE A. L'ÉLECTRICITÉ

Tableau 2. Paramètres des différents modèles de prédiction de la tension à l'anode (V_a) et de la distance de plusieurs gradients de tension à partir du bord de l'anode (Pottier et al. 2015) ou du centre de l'anode (Beaumont et al. 2006). $D(0,1V/cm)$: distance du gradient de $0,1 V.cm^{-1}$ en cm D_a : diamètre de l'anode en mm V_a est exprimée en V et le rapport cyclique en %; 100 % de rapport cyclique équivaut à du DC

Types d'appareils	Types de courant	Variable prédite	Paramètres	Valeurs	Écart-type
Appareils portatifs	DC et PDC	Tension à l'anode V_a	Constante	-34,45	3,54
			$D(0,1 V.cm^{-1})$	1,61	0,041
			Rapport cyclique (%)	0,27	0,035
		$D(0,1 V.cm^{-1})$	Constante	27,81	1,44
			V_a	0,56	0,014
			Rapport cyclique (%)	-0,18	0,018
Types d'appareils	Types de courant	Variable prédite	Paramètres	Valeurs	Écart-type
Appareils non portatifs	DC	Tension à l'anode V_a	$D(0,1 V.cm^{-1})$	1,30	0,012
			Constante	12,61	3,56
			V_a	0,7	0,019
Types d'appareils	Types de courant	Variable prédite	Paramètres		
Appareils portatifs et non portatifs	DC et PDC	Courant continu et continu pulsé	$D(0,1 V.cm^{-1})$		
			$D(0,5 V.cm^{-1})$		
			$D(1 V.cm^{-1})$		

Valeur t de Student	Pr > t	R ² ajusté	Individus statistiques	Sources
-9,73	<0,001	0,86	262	
39,26	<0,001			
7,72	<0,001			
Équation du modèle: $V_a = -34,45 + 1,61 * D(0,1 V.cm^{-1}) + 0,27 * \text{Rapport cyclique}$				Pottier et al. (2015)
19,36	<0,001	0,88	262	
40,11	<0,001			
-9,64	<0,001			
Équation du modèle: $D(0,1 V.cm^{-1}) = 27,81 + 0,56 * V_a - 0,18 * \text{Rapport cyclique}$				
Valeur t de Student	Pr > t	R ² ajusté	Individus statistiques	Sources
108,7	<0,001	0,87	168	
Équation du modèle: $V_a = 1,25 * D(0,1 V.cm^{-1})$				Pottier et al. (2015)
3,55	<0,001	0,89	168	
36,35	<0,001			
Équation du modèle: $D(0,1 V.cm^{-1}) = 12,61 + 0,70 * V_a$				
Équation des modèles				
$D(0,1 V.cm^{-1}) = [-0,75 \times \ln(V_a) + 0,8] \times Da^{0,16 \times \ln(V_a) - 0,21}$				
$D(0,5 V.cm^{-1}) = [-0,94 \times \ln(V_a)]$				Beaumont et al. (2006)
$D(1 V.cm^{-1}) = [-0,94 \times \ln(V_a) + 11,7] \times Da^{0,16 \times \ln(V_a) - 0,57}$				

2.6 Le générateur thermique

Le générateur thermique est utilisé pour sa puissance. La puissance requise dépend de nombreux paramètres: la tension appliquée aux électrodes, la forme de l'onde, la résistance équivalente totale conditionnée par la conductivité ambiante, la taille et le nombre d'électrodes.

Les générateurs utilisés proposent en général un courant alternatif à 230 V qui peut être monophasé ou triphasé.

La puissance des générateurs est exprimée en volts.ampères (VA) ou en watts (W). Ces deux unités sont liées par le facteur de puissance (voir partie 2.4.2). Pour un bon fonctionnement de l'engin de pêche à l'électricité, il est important que la puissance requise ne dépasse pas celle qu'est capable de fournir le générateur. Avant une opération de pêche, il est donc nécessaire de s'assurer que le générateur puisse fournir une puissance adéquate.

En termes de puissance, il n'y a pas d'inconvénient à utiliser un générateur qui fournisse une puissance largement supérieure à celle qui est requise. Par contre, étant donné que la puissance est liée au poids du générateur, il est préconisé d'utiliser un générateur avec une puissance adéquate à celle qui est requise afin de limiter le surplus de poids qui est à porter lors des phases de terrain.

Une fois le courant créé par le générateur thermique, il traverse la boîte de contrôle qui va permettre de transformer le courant. Lors de cette phase de transformation, il y a une perte de puissance qui est liée aux commutations, à la transformation, aux circuits de contrôles et/ou à la conduction. Le rapport de la puissance à la sortie et de la puissance à l'entrée de la boîte de contrôle est appelé le rendement de conversion. Avec les engins de pêche actuels, ce rendement peut atteindre entre 80 % et 90 %.

2.7 La batterie ou accumulateur

Lorsque l'engin de pêche à l'électricité est alimenté à l'aide d'une batterie, il est important d'en connaître le fonctionnement pour une utilisation optimale.

2.7.1 Généralités

Le terme batterie désigne de petits réservoirs qui peuvent emmagasiner de l'énergie pour la restituer ultérieurement. Il s'agit d'un dispositif électrochimique qui est capable de convertir l'énergie chimique en énergie électrique grâce à une réaction chimique d'oxydoréduction. Il existe plusieurs types de mélanges chimiques qui possèdent la capacité d'accumuler et de restituer de l'énergie.

Les types de batterie les plus utilisés actuellement sont:

- la batterie au plomb: il s'agit d'un ensemble d'accumulateurs en série dotés d'un mélange plomb-acide sulfurique. Les batteries au plomb sont robustes et puissantes mais lourdes. Elles sont souvent utilisées dans des applications où le poids n'est pas un inconvénient et/ou lorsqu'il y a besoin d'une grande quantité d'énergie;
- la batterie au nickel: il s'agit d'un accumulateur qui peut être doté d'un mélange nickel-cadmium (Ni-Cd) ou nickel-hydrure métallique (Ni-MH). Les accumulateurs Ni-Cd sont désormais interdits par la directive 2006/66/CE et sont remplacés par les accumulateurs Ni-MH. Les batteries au nickel sont très utilisées pour les outils portatifs;
- la batterie au lithium: il s'agit d'un accumulateur doté d'un mélange à base de Lithium sous forme ionique. Les différents types de mélanges sont lithium-ion (Li-ion), lithium-polymère (Li-po) et lithium-fer-phosphate (LiFePO4). Ce type de batterie est la dernière génération, il est plus léger et plus cher. Il nécessite un chargeur différent des autres types de batterie sous risque d'explosion en cas d'erreur de charge.

2.7.2 La capacité de la batterie

La capacité est la caractéristique principale d'une batterie. Elle est couramment appelée capacité nominale d'une batterie ou d'un accumulateur (notée C ou Cn). Il s'agit de la quantité d'énergie qu'une batterie est capable d'emmagasiner et par conséquent celle qu'elle peut restituer. La capacité s'exprime en ampères-heures de symbole Ah.

Par exemple une batterie de 2 Ah est capable de restituer 2 ampères pendant 1 heure ou 1 ampère pendant 2 heures ou 0,5 ampère pendant 4 heures, etc.

La capacité varie selon les types de batterie et des technologies. Elle peut varier de quelques dizaines de mAh pour des accumulateurs boutons au nickel ou au lithium, à plus de 4 000 Ah pour des batteries au plomb.

La capacité restituée par une batterie n'est pas constante, même à charge égale. Elle dépend des conditions de décharge. Plus il fait froid, plus le courant demandé sera important et donc plus la capacité de la batterie est faible, et inversement.

Pour un même type de batterie, la capacité est proportionnelle au volume de la batterie. Cependant deux batteries de types différents ayant un même volume/poids n'ont pas la même capacité. Le rapport de la capacité en fonction du poids est caractérisé par la densité d'énergie exprimée en Wh.kg⁻¹. La densité d'énergie est également appelée facteur de mérite.

2.7.3 La tension fournie par la batterie

Dans le cas des batteries, le terme de tension nominale est utilisé. Il s'agit de la valeur moyenne de la tension de la batterie en phase de décharge. La valeur de la tension nominale varie au cours du temps et de l'utilisation. La tension nominale varie aussi selon le type de batterie utilisé. Les variations de cette tension sont en partie dues à la résistance interne de la batterie.

2.7.4 La résistance interne

La résistance interne de la batterie provoque la chute de la tension délivrée par la batterie lorsque l'ampérage du courant est augmenté. Il s'agit d'une caractéristique pénalisante de la batterie. Cette résistance est due à l'inertie de la réaction chimique, aux connexions internes et aux circuits de protection (pour certaines batteries) intégrés dans la batterie. Généralement, cette résistance est exprimée en milliohms (mΩ).

2.7.5 La charge et la décharge de la batterie

La charge

La charge est la phase de stockage d'énergie dans la batterie. Elle consiste à convertir l'énergie électrique en énergie chimique stockée dans un récipient. Généralement, un chargeur adapté à la batterie est utilisé pour cette phase de remplissage. Les modes de charges sont différents pour chaque type de batterie. Il n'est donc pas possible d'utiliser un même chargeur construit pour une technologie particulière pour charger une batterie possédant une autre technologie.

Lors de la charge, la conversion d'énergie génère des pertes. Le rendement de la charge n'est jamais de 1. Il oscille entre 0,5 et 0,75 selon les types de batterie et le mode de charge. En conséquence, il faut fournir plus d'énergie pour charger une batterie qu'elle sera capable d'en restituer.

Lorsque la charge est terminée et si elle n'est pas stoppée, la batterie passe en surcharge. Cette surcharge peut produire différents effets selon le type de batterie utilisé. Elle peut induire une élévation succincte de la température sans conséquence mais peut aller jusqu'à la destruction partielle de la batterie, voire à une explosion.

La surcharge est également à l'origine des problèmes d'effet mémoire des batteries Ni-Cd.

La décharge

Lorsque la batterie est chargée, il est alors possible d'utiliser l'énergie qui y est stockée. Il s'agit de la phase de décharge. L'énergie chimique contenue se transforme en énergie électrique. La batterie fournit de l'électricité sur demande du moment qui lui reste de l'énergie chimique. Cependant, si une batterie demeure trop longtemps en décharge, le système chimique d'échange d'électricité mis en œuvre lors des phases de charge et de décharge sera alors désamorcé. La batterie sera dite « morte ».

Il est conseillé de ne pas effectuer des décharges trop profondes car même si la décharge n'est pas totale, la batterie peut vieillir prématurément.

Lors de la décharge, la tension aux bornes de la batterie évolue en fonction du courant consommé et de la résistance interne. Lorsque l'accumulateur est vide, en fin de décharge, la tension chute brutalement.

Une batterie ne doit pas être déchargée en dessous d'un certain seuil afin de ne pas être endommagée. Dans le cas des appareils de pêche à l'électricité, il est recommandé d'utiliser au maximum 30 % de la capacité nominale des batteries afin qu'elles supportent un grand nombre de cycles d'utilisation.

Il existe aussi un phénomène d'auto décharge. Il s'agit d'une « fuite normale » de la batterie. Elle se vide de son énergie même lorsqu'elle n'est pas utilisée. Le taux de perte de la capacité de la batterie varie en fonction de la technologie utilisée. Il est généralement exprimé en pourcentage de perte par mois. L'autodécharge augmente avec l'âge de la batterie et avec la température.

2.8 L'essentiel à retenir

La taille du champ électrique dans l'eau est influencée par :

- la tension à l'anode V_a : plus V_a augmente, plus le champ d'attraction augmente ;
- le rapport cyclique lors de l'utilisation du PDC : plus il diminue, plus le champ d'attraction augmente ;
- le couple anode-cathode : plus la cathode sera grande (résistance équivalente plus faible) par rapport à l'anode, plus V_a sera grande et donc plus le champ d'attraction augmentera ;
- la qualité de l'anode : l'utilisation d'une anode oxydée induit une diminution du champ électrique ;
- la proximité des anodes lors de l'utilisation de deux anodes : lorsqu'elles sont proches, le champ d'attraction se réduit ;
- la forme de l'anode : une forme d'anneau ou sphérique permet d'avoir un champ électrique homogène contrairement à d'autres formes d'anode (carrée, triangulaires, de barre) ;
- la forme de la cathode : lorsque la cathode est composée de plusieurs brins, ces derniers peuvent se coller ce qui fait varier sa résistance équivalente et donc le champ d'attraction à l'anode.

Pour fournir la tension requise, il faut que l'engin de pêche à l'électricité puisse délivrer la puissance adéquate. Cette puissance demandée dépend de :

- la tension voulue : plus la tension augmente, plus la demande en puissance augmente ;
- la conductivité ambiante : plus la conductivité augmente, plus la demande en puissance augmente.

Un engin de pêche à l'électricité est alimenté en énergie soit avec un générateur thermique soit à l'aide de batterie. Le mode d'alimentation en énergie va conditionner la puissance utilisable par l'engin de pêche à l'électricité.

B Poissons



© Michel Monsay - OFB

- 3** Le poisson soumis au champ électrique 42
- 4** Les impacts de la pêche à l'électricité sur l'ichtyofaune 51
- 5** Les facteurs qui influent sur l'efficacité de pêche 59



3 Le poisson soumis au champ électrique

3.1 Les mécanismes physiologiques responsables de la réponse du poisson face au champ électrique

3.1.1 Le système neuromusculaire d'un poisson

Le neurone est la cellule principale du fonctionnement du système nerveux (Figure 35). Cette cellule excitable est capable de transmettre un signal électrochimique d'un point à l'autre de l'organisme. Les neurones sont positionnés en série et en parallèle et forment des chaînes grâce aux synapses (zone de contact entre deux neurones ou entre un neurone et une autre cellule), où l'impulsion est élaborée.

La somme de ces éléments constitue un nerf, qui peut être sensitif ou moteur. Les nerfs sensoriels conduisent les excitations périphériques au cerveau ou à la médulla, lieux où les réflexes sont initiés. Ces réflexes sont transmis aux muscles grâce au système nerveux moteur. Pour le poisson, les nerfs sensoriels et moteurs sont orientés dans le corps à 45° par rapport à l'axe longitudinal. Ils constituent une symétrie bilatérale par rapport à cet axe.

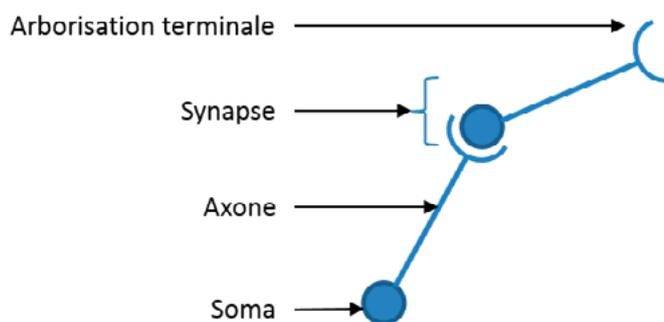


Figure 35. Liaison entre deux cellules nerveuses.

3.1.2 Effet des courants sur le système nerveux des poissons

Le DC et le courant pulsé ont des procédés d'action légèrement différents. Le DC agit sur le corps des cellules nerveuses (soma) et sur les fibres musculaires (effet d'electrotonus), mais pas sur les fibres nerveuses (axone et arborisation terminale). Le courant pulsé agit sur les fibres nerveuses et les muscles (Loi de Pflüger) (Pflüger, 1859 dans Lamarque, 1990a).

Sous l'application du DC, selon la loi de l'electrotonus, les cellules nerveuses sont soit facilitées soit inhibées par le courant (Charbonne Salle, 1881 dans Lamarque, 1990a). La facilitation est une augmentation de l'excitabilité de la cellule, à l'inverse, l'inhibition est une baisse de cette excitabilité. Si une de ces cellules est facilitée, elle va transmettre sa stimulation en produisant une augmentation de la pulsion du réflexe qui provient d'une voie en amont. Elle peut aussi produire une stimulation directe sur la fibre nerveuse en délivrant une forte tension. Lorsque l'inhibition apparaît, elle diminue les stimulations provenant des voies en amont ou les supprime en produisant une inhibition anodique (Figure 36).

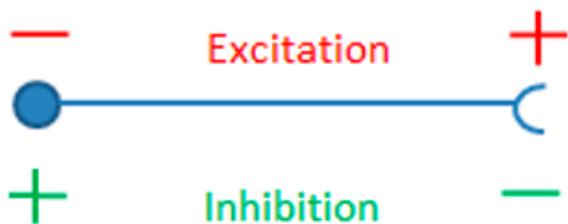
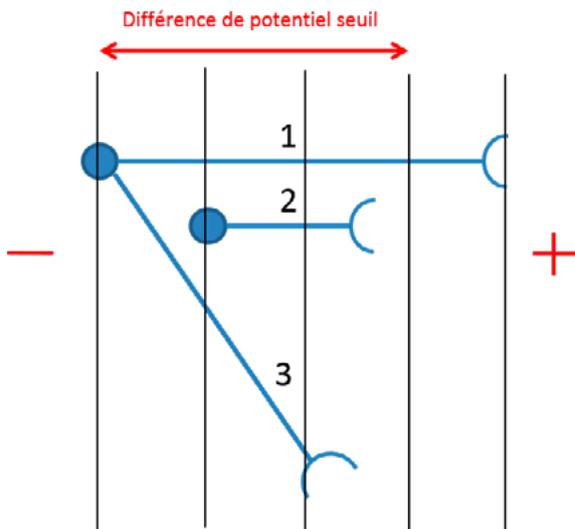


Figure 36. Principe simplifié de l'excitation (facilitation) et de l'inhibition d'une cellule nerveuse face à une anode (+) ou une cathode (-).



La loi de Rushton (Rushton, 1927) précise que la longueur du nerf et sa position dans le champ électrique ont une influence sur son seuil de stimulation (Figure 37).

Figure 37. Seuil d'excitation d'un neurone placé dans un champ électrique. Le neurone 1 est excité tandis que les neurones 2 et 3 ne le sont pas.

Le seuil de stimulation du nerf ou du muscle dans un champ électrique décroît comme la fonction cosinus de l'angle formé avec la ligne de courant. Quand le poisson nage dans un champ électrique, l'excitabilité des structures est constamment modifiée par le changement d'orientation des nerfs spinaux et médullaires dans ce champ (Figures 37 et 38).

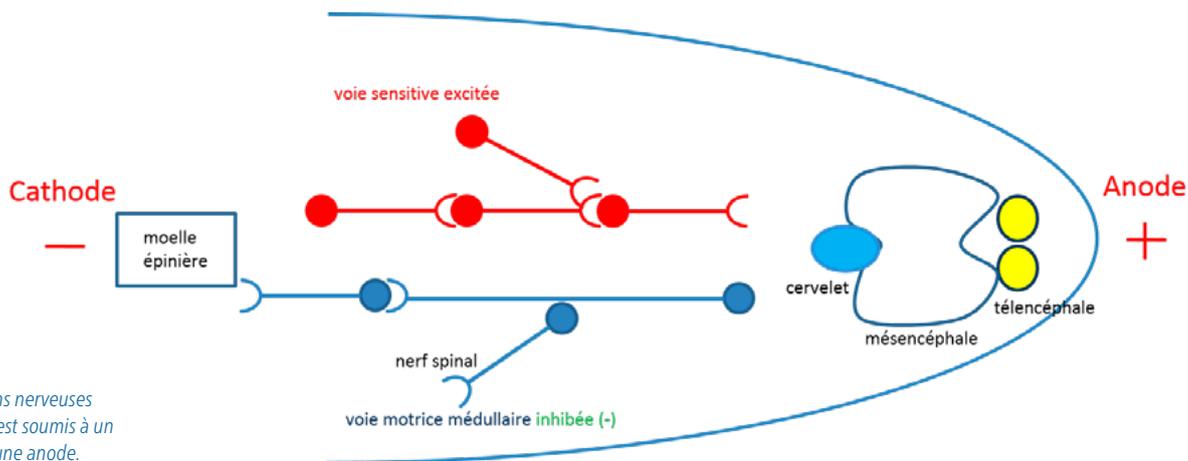


Figure 38. Réactions nerveuses lorsqu'un poisson est soumis à un courant DC face à une anode. À la figure sont associées les différentes réactions avec la valeur seuil du gradient de tension du champ électrique. Source : Cuinat (1968).

Gradient (V/cm)	Effet sur une Truite fario de 20 cm
0,12	Nage inhibée
0,15	Nage forcée
0,33	Galvanonarcose
0,75	Pseudo-nage forcée
1,25	Tétanie

3.1.3 Les paradigmes de Biarritz et de Bozeman

Il existe un débat concernant les causes et les mécanismes amenant à la réponse du poisson. Deux points de vue prédominent: le paradigme de Biarritz et celui de Bozeman. Le plus ancien (Biarritz) a été proposé par Lamarque (1990a). Le modèle de Lamarque inclut les principes de la théorie des transferts de puissance de Kolz (1989). Il s’agirait d’une réaction de réflexe suite à l’électrostimulation du système nerveux central (SNC), du système nerveux autonome (SNA) et des muscles du poisson. Lorsque le poisson nage dans un champ électrique, l’excitabilité des structures associées aux nerfs spinaux (acheminant l’information entre la moelle épinière et les muscles, les articulations et la peau) et médullaires est constamment modifiée par leur changement d’orientation dans le champ. D’un autre côté le paradigme de Bozeman (Sharber et Black, 1999) suggère que la réponse du poisson est liée aux différentes phases de l’épilepsie (automatisme, petit mal et grand mal) déjà observées chez les patients sujets à une électroconvulsivothérapie. Ce paradigme suggère que les comportements observés sur le poisson sont le résultat de l’addition de réactions neurologiques conduisant à une sur-stimulation du SNC.

3.2 Les zones de réaction du poisson soumis à un champ électrique

3.2.1 Pour toutes les formes de courant

Qu’importe le type de courant (AC, DC ou Pulsé), il existe des zones communes de réaction des poissons dans le champ électrique (Tableau 3; Snyder, 2003a):

- la zone d’indifférence est l’aire où le champ électrique n’a pas d’influence sur les poissons;
- la zone de répulsion se situe à la périphérie du champ actif. Le poisson sent la présence du champ mais celui-ci n’est pas assez intense pour qu’il soit attiré. L’animal réagit en s’échappant ou en cherchant un refuge;
- la zone d’attraction / de taxie (uniquement pour le DC et le courant pulsé) est une zone où le poisson est attiré en direction de l’électrode. Dans le cas du DC, le poisson effectue un demi-tour et nage en direction de l’anode. Dans le cas du courant pulsé, le poisson effectue un demi-tour et c’est l’inertie provoquée par ce mouvement qui induit un rapprochement en direction de l’anode;
- la zone de tétanie (lors de l’utilisation de l’AC, le DC et le courant pulsé) est la région d’immobilisation du poisson. Pour les AC, les courants pulsés et les champs extrêmement élevés de DC, les poissons ont leurs muscles sous tension et leur fonction respiratoire cesse. Les poissons ont besoin de plusieurs minutes pour récupérer. La tétanie peut blesser les poissons. Il est recommandé de minimiser cette zone lors des réglages des appareils et d’en extraire les poissons le plus rapidement possible.

Tableau 3. Zones de réaction des poissons soumis à un champ électrique, selon différents types de courants

Zones de comportement communes	DC (Courant continu)	Courant pulsé	AC (courant alternatif)
Zone d'indifférence	Zone d'indifférence	Zone d'indifférence	Zone d'indifférence
Zone de répulsion	Zone de répulsion	Zone de répulsion	Zone de répulsion
Zone d'attraction	Alignement Galvanotaxie/Nage forcée	Electrotaxie	Oscillotaxie Oscillotaxie transverse
	Galvanonarcose Pseudo nage forcée	Narcose	
Zone de tétanie	Tétanie	Tétanie	Tétanie

Pour une plage de conductivité de 100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 10000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, il est admis que les seuils théoriques de la détection réactive-galvanotaxie et de tétanie dans le cas d’application du DC sont respectivement de l’ordre de 0,1 $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ et 1 $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$. Dans le cas du PDC, pour une même plage de conductivité, les seuils théoriques de taxie et de tétanie sont respectivement de l’ordre de 0,1 $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ et 0,5 $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Cuinat, 1968; Kolz et Reynolds, 1989; Lamarque, 1968; Meismer, 1999; Snyder, 2003a).

3.2.2 Exposition au courant continu (DC)

Face à l'anode, lorsqu'un poisson est soumis à un champ électrique alimenté par du DC, il réagit selon cinq phases (Lamarque, 1968, 1990a):

- l'alignement ou courbure anodique: si le poisson est déjà face à la cathode, les cellules nerveuses situées en face de l'encéphale (SNC) sont stimulées, produisant un réflexe de nage (Figure 39 A et B). Ensuite, durant les ondulations de la première nage, par exemple vers la gauche, le corps se courbe. Sous la stimulation électrique, le poisson va s'aligner en direction de l'anode. Ce changement de position par rapport à l'anode va induire une stimulation maximale des nerfs moteurs spinaux de la partie gauche (dans le cas de la Figure 39). Ceci amène donc le poisson à poursuivre sa courbe en position transversale dans le champ (Figure 39 C). Cette stimulation unilatérale conduit le poisson à faire un demi-tour sur lui-même. Durant ce retournement, les nerfs spinaux du côté droit sont fortement inhibés, mais aucune inhibition n'apparaît sur ceux du côté gauche (Figure 39 D). Les réflexes sont donc au maximum du côté gauche, ce qui permet au poisson de compléter son demi-tour en direction de l'anode (Figure 39 E);
- la galvanotaxie ou la nage forcée: le poisson est alors en face de l'anode. Pour une tension faible, une première nage en direction de l'anode peut être induite. En se rapprochant de l'anode le poisson est soumis à un gradient de tension plus fort. Lors de cette étape de première nage, le poisson est toujours capable de s'échapper du champ d'attraction. S'il atteint la zone où le gradient de tension est assez fort pour déclencher la deuxième nage en direction de l'anode, il ne pourra plus fuir. C'est l'excitation asymétrique des nerfs spinaux qui le ramène en direction de l'anode à chaque fois qu'il essaie de s'en écarter. Durant cette étape, la réaction est le résultat de la participation des nerfs moteurs spinaux qui détendent les muscles (curarisation) mais la corde spinale n'est pas affectée;
- la narcose: elle apparaît lorsque le poisson devient immobile. Dans cet état de narcose, les muscles sont relâchés et le poisson continue à respirer mais faiblement, on appelle cela la galvanonarcose. Lorsque le poisson est retiré de cette zone, il recouvre instantanément ses fonctions de manière relativement normale;
- la pseudo-nage forcée: elle apparaît lorsque le système nerveux spinal réagit à des intensités plus fortes du courant. Il est composé de chaînes courtes en positions obliques. Les nerfs spinaux excitent les muscles associés. Cette nage n'est plus sous le contrôle du SNC;
- la tétanie: lorsque le poisson est vraiment proche de l'anode, il est soumis à de très fortes tensions. Les muscles atteignent leur seuil d'excitation, ils passent d'un état de relaxation à des spasmes.

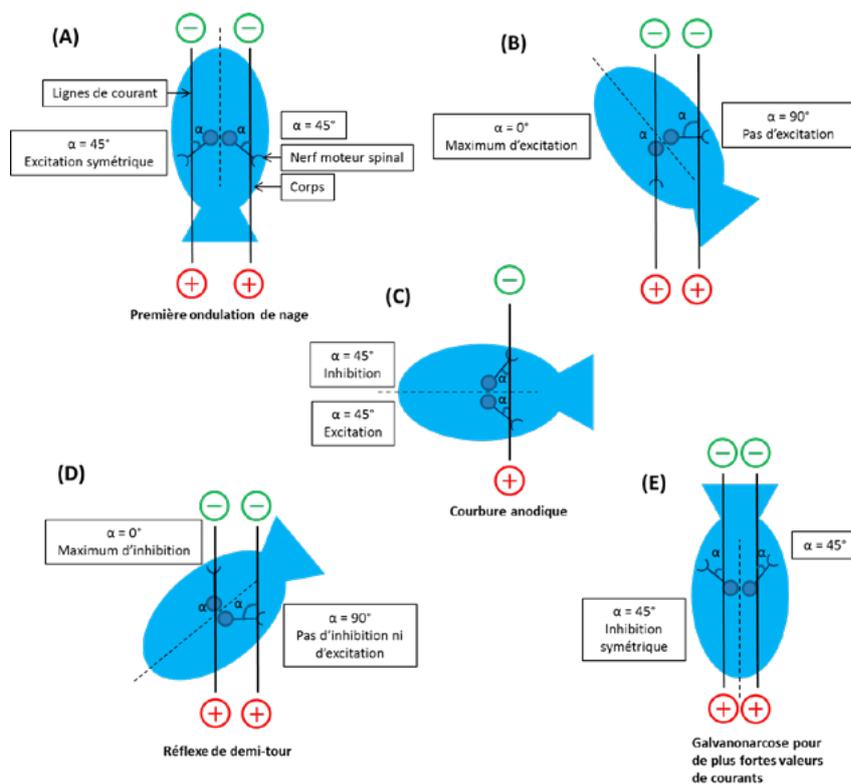


Figure 39. Mécanismes de demi-tour en direction de l'anode (+) lorsque le poisson est soumis à un champ de courant continu et est initialement face à la cathode (-). D'après Lamarque, 1990a.

3.2.3 Exposition au courant continu pulsé (PDC)

Lorsqu'un poisson est soumis à un champ électrique alimenté par du PDC, et face à l'anode, il réagit selon trois phases principales (Lamarque, 1968, 1990a):

- l'alignement ou courbure anodique: lorsque le poisson est face à la cathode, à de faibles valeurs de gradient de tension (80 mV.cm^{-1}), toutes les fibres sensorielles et motrices sont plus ou moins stimulées, le poisson nage. Comme avec le DC, le poisson subit la phase de courbure anodique. Lorsque le poisson est en position de courbure anodique, il est en travers du champ électrique. La stimulation des nerfs spinaux des deux côtés du corps est asymétrique mais différente de celle du DC du fait que le côté droit (selon l'exemple cité dans le cas du DC) est plus fortement stimulé par le PDC pour une même tension de sortie appliquée. Le poisson n'effectue pas un demi-tour complet pour se positionner face à l'anode mais reste en position transverse dans le champ. Les causes ne sont actuellement pas expliquées du fait de la complexité des formes que peut prendre le PDC;
- l'électrotaxie: avec le PDC, il n'y a pas de demi-tour complet ni de véritable électrotaxie anodique. La nage involontaire est due à effet direct du champ électrique sur le système nerveux autonome lors de l'application du PDC. Les muscles se contractent lors de chaque impulsion d'électricité ce qui accentue la nage. Si le poisson s'approche de l'anode, c'est en partie grâce à l'inertie produite par le poisson lors de la courbure anodique qui l'entraîne autour de l'anode. L'effet attractif est moins important qu'en utilisant du DC, voire très peu pour les espèces benthiques. L'attraction peut provenir également du courant de la rivière contre lequel le poisson ne peut plus lutter;
- la narcose/tétanie: tout comme le DC, lorsque le poisson est vraiment proche de l'anode, il est immobilisé. Par contre il est soumis à de plus fortes tensions. Les muscles atteignent leur seuil d'excitation, ils passent d'un état de relaxation à des spasmes.

3.2.4 Exposition au courant alternatif (AC)

Lorsqu'un poisson est soumis à un champ électrique alimenté par de l'AC, et face à l'anode, il réagit selon trois phases principales (Lamarque, 1968, 1990a; Scheminzky, 1934):

- l'oscillotaxie: la direction du courant change tous les demi-cycles sur courant, il n'y a donc pas d'effet de polarité sur l'organisme. Le poisson va donc faire face à l'anode et la cathode successivement autant de fois que le signe du courant change, il y a une stimulation générale des nerfs moteurs. Si le poisson est face à une électrode, il va nager dans sa direction du fait d'une stimulation générale du corps similaire à celle du PDC;
- l'oscillotaxie transverse: après plusieurs nages dans chaque direction, le poisson adopte une position transversale, en travers du courant et parallèle aux lignes isopotentielles. Dans cette position il n'y a pas de courbure anodique du fait de la stimulation symétrique des deux côtés du corps. Il n'y a pas d'effet polarisé avec l'AC;
- la tétanie: si le poisson qui subit l'oscillotaxie transverse tente de s'échapper, il est forcé de s'aligner et le gradient de tension qui le traverse augmente. Pour une faible augmentation de ce gradient de tension le poisson est tétanisé sur place.

3.3 La conductivité de l'eau et du poisson

Le ratio de la conductivité du poisson avec celle de l'eau va influencer l'action du champ électrique. La différence de potentiel qui traverse le corps du poisson varie en fonction du rapport qu'il existe entre la conductivité de l'eau et celle du poisson (Vibert, 1968). La Figure 40 permet de mieux comprendre ce phénomène. Les lignes horizontales représentent les lignes du courant électrique, et les deux lignes verticales aux extrémités de l'ellipse (représentant le poisson) sont équipotentielles. Dans le cas A, la conductivité du poisson est inférieure à celle de l'eau, il est donc plus facile au courant de circuler le long du poisson sans le traverser. De ce fait le poisson reçoit un gradient de tension de la tête à la queue plus élevé. Dans le cas B, les conductivités du poisson et de l'eau sont égales. Le poisson ne modifie pas le gradient de tension qu'il subit. Dans le cas C, la conductivité du poisson est supérieure à celle de l'eau. Le courant ayant tendance à aller en direction des milieux les plus conducteurs, il a tendance à traverser le corps du poisson plutôt que de circuler le long de son corps. Le poisson subit donc un gradient de tension moins élevé.

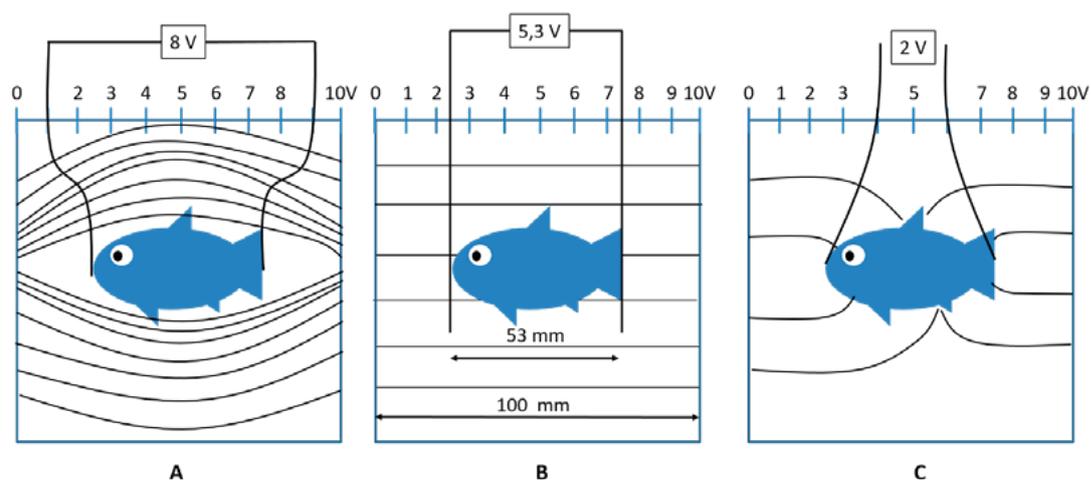


Figure 40. Variation de la différence de potentiel du corps d'un poisson en fonction de la conductivité de l'eau - D'après Vibert, 1968.

A: Poisson moins conducteur que le milieu

B: Poisson aussi conducteur que le milieu

C: Poisson plus conducteur que le milieu

Les premières estimations de la conductivité d'un poisson étaient basées sur l'implant d'électrodes pour mesurer la résistance dans un circuit électrique en série. De ce procédé, la conductivité calculée a été nommée « vraie conductivité » car elle est issue de la théorie électrique des résistances (Halsband, 1968; Whitney et Pierce, 1957). Kolz (1989) a ensuite introduit la notion de conductivité efficace. Il s'agit de la valeur de la conductivité ambiante de l'eau qui requiert le minimum de densité de puissance pour induire une réponse particulière de la part d'un poisson (frémissement de la queue, électrotaxie, nage forcée, narcose, tétanie). Par exemple, Kolz et Reynolds (1989) ont noté des valeurs de conductivité efficace de 69-160 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour le carassin doré. Miranda et Dolan (2003) ont déterminé des valeurs de conductivité efficace d'un poisson vivant se situant dans un intervalle de 75-175 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ en appliquant les principes du transfert maximal de puissance. L'*American Fisheries Society* a adopté 115 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ comme valeur standard de la conductivité efficace d'un poisson (Miranda, 2009). C'est le point où la conductivité efficace d'un poisson est constante alors que la conductivité de l'eau peut varier énormément.

D'autre part, Halsband (1968) a noté des « vraies conductivités » incluses dans l'intervalle 814-1220 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour diverses espèces (Tableau 4). Whitney et Pierce (1957) ont noté que la conductivité d'une carpe varie en fonction de la température (Tableau 5). Ces valeurs impliquent de prendre en considération les différentes saisons lors du réglage des engins de pêche.

Tableau 4. "Vraie conductivité" de différentes espèces de poissons.
Source: Halsband (1968)

Espèces	Conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
Truite	1220
Perche	1019
Carpe	870
Gardon	814

Tableau 5. Variation de la « vraie conductivité » d'une carpe en fonction de la température. Source: Whitney et Pierce (1957)

Température ($^{\circ}\text{C}$)	Conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
5	372
10	543
15	714
20	1026
25	1969

Plus tard est apparue la notion de conductivité d'immersion (Kolz, 2006). C'est la valeur de la conductivité ambiante à laquelle il y a un maximum de transfert de puissance dans une matière totalement immergée dans un champ électrique homogène.

Ces différentes études montrent qu'il n'y a pas de méthodes standardisées pour mesurer la conductivité des poissons.

3.4 La théorie des transferts de puissance

Kolz (1989) a proposé la théorie des transferts de puissance (Power Transfert Theory). Elle suggère que la densité de puissance (D) est transférée de l'eau au poisson, ce qui détermine le succès ou l'échec de la pêche à l'électricité (Figure 41). Cette théorie permet d'expliquer certaines situations rencontrées, mais des problèmes apparaissent lorsqu'elle est appliquée sur des courants de type pulsé (Beaumont *et al.*, 2000).

L'intérêt de cette théorie est de mettre à disposition une méthode où les réglages des appareils de pêche à l'électricité peuvent être standardisés en fonction de la conductivité et de la température de l'eau, permettant d'avoir des résultats comparables.

Selon Kolz (1989) l'efficacité avec laquelle la puissance est transférée dans le poisson est maximisée lorsque la résistivité de l'eau et du poisson sont égales. Lorsque l'eau est plus résistante que le poisson (l'eau est moins conductrice que le poisson), le courant a tendance à circuler à travers le poisson. Lorsque le poisson a plus de résistance que l'eau (le poisson est moins conducteur que l'eau), le courant a tendance à circuler davantage dans l'eau. Dans chacun des cas, la puissance transférée dans le poisson est réduite.

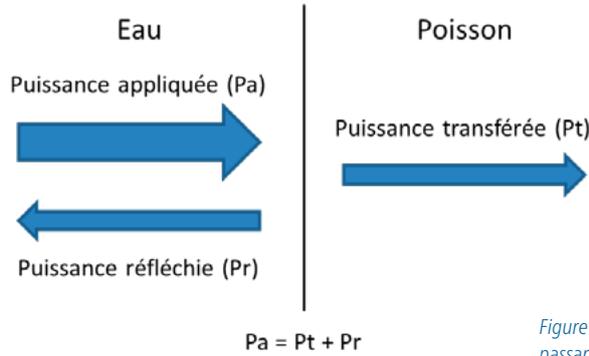


Figure 41. Flux de puissance électrique passant de l'eau au poisson.

Kolz (1989) a donc proposé un modèle qui ajuste la puissance transmise dans l'eau pour compenser l'inefficacité de transfert de la puissance traversant le poisson. Ce modèle peut être utilisé pour estimer la puissance qui doit être appliquée dans l'eau en fonction de différentes conductivités afin de délivrer une puissance constante au poisson.

Autrement dit, la théorie des transferts est basée sur le concept suivant: pour un jeu d'électrodes donné et une certaine tension appliquée, le maximum de puissance est appliqué sur le poisson lorsque sa conductivité (Cf) est égale à celle de l'eau (Cw). Si le ratio de conductivité (Cf / Cw) dévie de 1, le transfert de puissance devient moins efficace: la densité de puissance devra être ajustée pour revenir à un ratio égal à 1 (Figure 42).

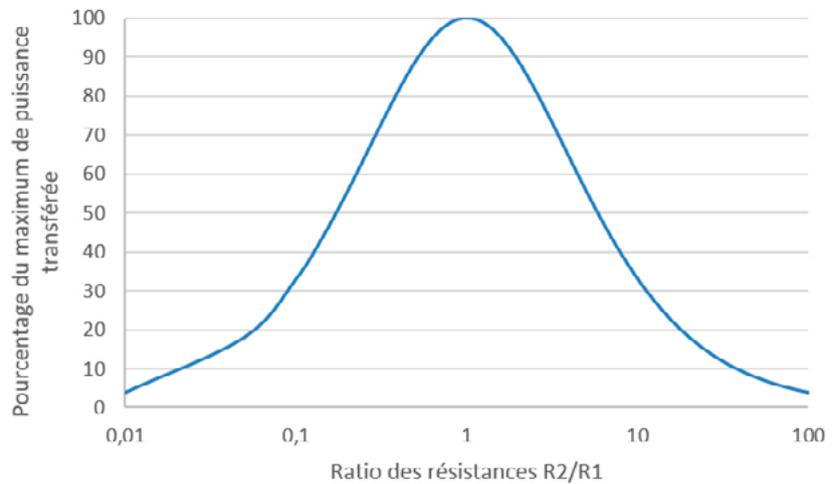


Figure 42. Courbe normalisée du maximum de transfert de puissance. R1 : résistance du milieu 1 (par exemple l'eau) R2 : résistance du milieu 2 (par exemple le poisson) D'après Kolz, 1989.

Une fois la conductivité du poisson connue, il est alors possible de connaître l'efficacité de transfert de puissance pour une conductivité ambiante de l'eau donnée. Kolz (1989) a mis en évidence un rapport de puissance transférée par rapport à la puissance fournie dans l'eau (noté MCP). Le MCP est défini à l'aide du rapport d'inadéquation q (Équation 23), qui est le ratio de la conductivité du poisson Cf sur la conductivité de l'eau Cw (Équation 24).

$$MCP = \frac{4q}{(1+q)^2} \tag{Équation 23}$$

$$q = \frac{cf}{cw} \tag{Équation 24}$$

La valeur de la puissance transférée dans le poisson P_t issu de la puissance appliquée dans l'eau P_w pour cette conductivité peut alors être obtenue (Équation 25).

$$P_t = P_w \times MCP \quad \text{Équation 25}$$

L'efficacité du transfert de puissance électrique (soit la valeur du MCP) de l'eau au poisson est donc une fonction dépendante de la conductivité (Figure 43). Le maximum de transfert de puissance apparaît lorsque la conductivité ambiante atteint la valeur de la conductivité efficace du poisson, et diminue à des valeurs inférieures et supérieures. Dans le cas du PDC, certains appareils permettent de régler le rapport cyclique pour maintenir un courant moyen constant pour une gamme de conductivité et pour un pic de tension constant. L'ajustement du rapport cyclique n'empêche pas une augmentation du pic J (densité de courant) lorsque la conductivité de l'eau augmente. Les poissons sont alors exposés à une densité de puissance supérieure même si le gradient de tension est constant. Pour certaines formes de PDC (60 Hz et différents rapports cycliques), cela n'est vrai uniquement que pour des rapports cycliques supérieurs à 50 % (Henry et Grizzle, 2006). Lors de leurs expériences, Henry et Grizzle (2006) ont montré que la mortalité de poissons juvéniles peut être prédite par des modèles incluant seulement les pics de tension E et la densité moyenne de courant J . Cela permet de ne pas faire appel à la Théorie des transferts de puissance et donc de ne pas déterminer la conductivité efficace des poissons lors de chaque test.

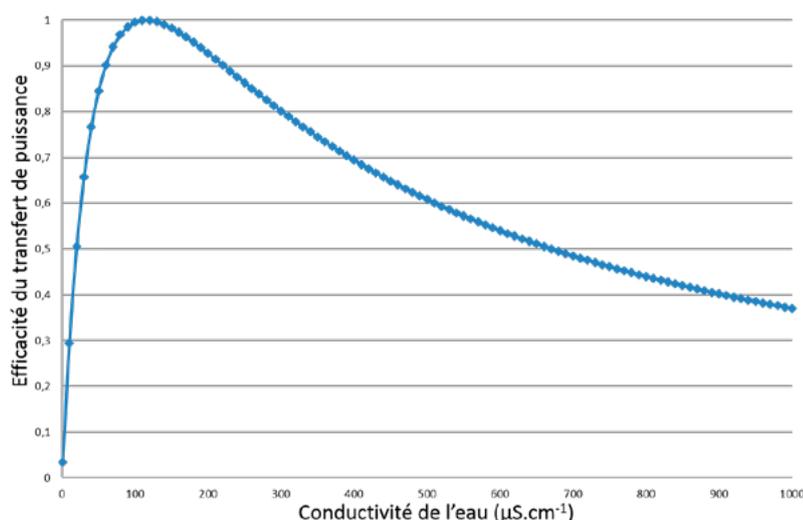


Figure 43. Efficacité du transfert (MCP) de la puissance transférée dans un poisson d'une conductivité de $115 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à partir d'une puissance appliquée dans l'eau en fonction de la conductivité ambiante de l'eau.

3.5 L'essentiel à retenir

Le DC et le courant pulsé ont des procédés d'action légèrement différents. Le DC agit sur le corps des cellules nerveuses (soma) et sur les fibres musculaires (effet d'electrotonus), mais pas sur les fibres nerveuses (axone et arborisation terminale). Le courant pulsé agit sur les fibres nerveuses et les muscles.

Deux théories s'opposent sur les causes et les mécanismes amenant à la réponse du poisson : le paradigme de Biarritz et celui de Bozeman. Celui de Biarritz inclut les principes de la théorie des transferts de puissance. Il s'agirait d'une réaction suite à l'électrostimulation du système nerveux central (SNC), du système nerveux autonome (SNA) et des muscles du poisson. Par ailleurs, le paradigme de Bozeman suggère que la réponse du poisson est liée aux différentes phases de l'épilepsie. Il suggère que les comportements observés sur le poisson sont le résultat de l'addition de réactions neurologiques conduisant à une sur-stimulation du SNC.

Il existe des zones de réaction du poisson en fonction de sa position dans le champ électrique autour de l'anode :

- zone d'indifférence : le poisson ne ressent pas le champ électrique ;
- zone de répulsion : le poisson ressent le champ électrique et s'enfuit ;
- zone d'attraction : l'intensité du champ électrique est suffisamment forte pour que le poisson soit attiré en direction de l'anode ;
- zone de tétanie : l'intensité du champ électrique est la plus forte à proximité de l'anode. Il s'agit d'une zone dangereuse où les poissons peuvent subir des impacts sur leur santé.

L'utilisation du DC ou du courant pulsé n'induisent pas la même réaction sur les poissons. Le DC permet un demi-tour complet en direction de l'anode, suivi par une nage forcée. Le courant pulsé ne permet pas ce demi-tour complet, il choque plus le poisson qu'il ne l'attire. Le poisson s'approche en direction de l'anode en partie grâce à l'inertie produite lors de la courbure anodique.

Le ratio de la conductivité du poisson et de la conductivité ambiante de l'eau va conditionner l'efficacité du champ électrique sur le poisson. Cette idée a amené à l'établissement de la Théorie des transferts de puissance. Elle suggère que le succès ou l'échec d'une pêche sont déterminés par la quantité de puissance transférée dans le poisson. Cette puissance transférée dépendrait du ratio de la conductivité du poisson et de la conductivité ambiante de l'eau.

4 Les impacts de la pêche à l'électricité sur l'ichtyofaune

4.1 Les impacts généraux

L'impact de la pêche à l'électricité sur les poissons a fait l'objet de plusieurs études (Dalbey *et al.*, 1996; Hollender et Carline, 1994; Sharber *et al.*, 1994; Snyder, 2003b). Divers impacts peuvent se produire: des changements de comportement (Mesa et Schreck, 1989), des stress physiologiques (Mesa et Schreck, 1989), une croissance réduite (Gatz *et al.*, 1986) et des blessures physiques comme la fragmentation de vertèbres et des hémorragies le long de la colonne vertébrale (Hollender et Carline, 1994; Sharber et Carothers, 1988). Snyder (2003a) a recensé plusieurs études de l'impact du courant sur la mortalité et les blessures des poissons. Généralement la mortalité immédiate ou à court terme induite par le PDC est basse ou quasiment aussi basse que celle induite par le DC. Par contre ce n'est pas le cas en ce qui concerne les blessures dont leur incidence s'accroît lorsque des fréquences supérieures à 15 Hz sont utilisées. Le taux de mortalité de dix espèces différentes de poisson a été évalué suite à l'exposition à un champ électrique (Henry *et al.*, 2004). Il s'avère que ce taux de mortalité diffère selon les espèces analysées. De plus, les juvéniles nouvellement métamorphosés ont une mortalité supérieure aux jeunes et plus vieux poissons ayant été exposés à un champ électrique (Henry *et al.*, 2003).

4.1.1 Les blessures spinales ou associées

Les poissons soumis à un champ électrique peuvent subir des compressions, des déviations et/ou des fractures de vertèbres. Ces dommages peuvent être associés à des côtes endommagées, des vessies natatoires lésées, des ruptures de l'artère dorsale et des arcs aortiques, et d'autres hémorragies (Figure 44).

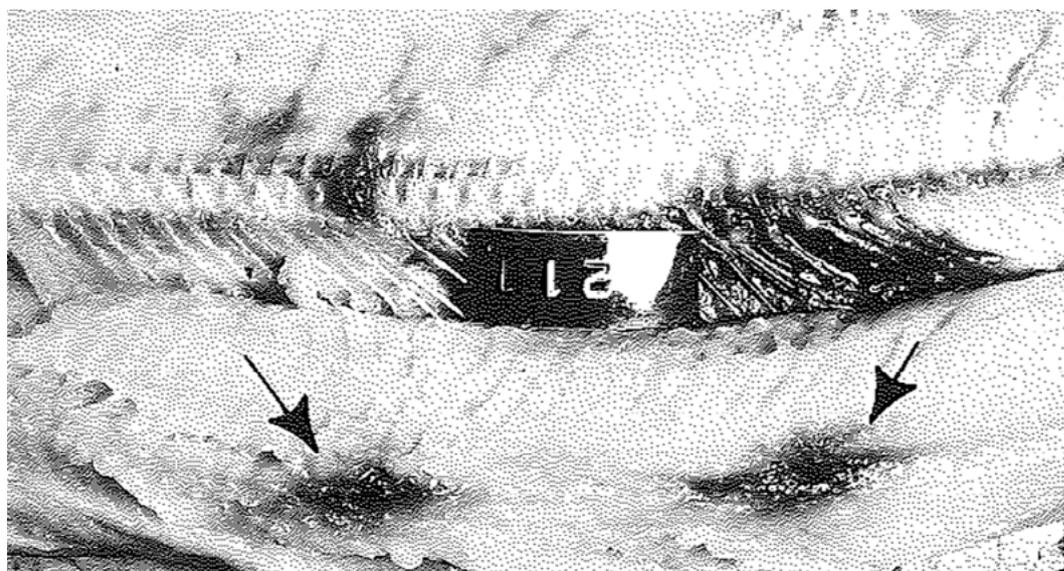


Figure 44. Autopsie d'une truite arc-en-ciel blessée lors d'une pêche à l'électricité (courant pulsé de forme $\frac{1}{4}$ de sinusoïde). Les flèches indiquent la localisation des hématomes.

© Sharber et Carothers (1988)

Ces lésions sont causées par de fortes convulsions passagères des muscles du corps. Certains auteurs (Lamarque, 1990a; Sharber *et al.*, 1994; Sharber et Black, 1999) pensent que les crises myocloniques apparaissent simultanément ou presque sur les deux parties latérales du corps. Ainsi la colonne vertébrale serait soumise à deux forces qui s'opposent et donc elle pourrait se casser, se comprimer ou se disloquer.

Les dommages vertébraux causés par la pêche à l'électricité sont habituellement accompagnés d'une rupture des vaisseaux sanguins, de déchirures musculaires ou ligamentaires, et quelques fois de détériorations d'autres tissus mous (Holmes *et al.*, 1990; Sharber et Carothers, 1988; Taylor *et al.*, 1957). Néanmoins Holmes *et al.* (1990) ont observé des hémorragies le long de la colonne vertébrale ou dans la musculature sans qu'il y ait de dommages associés aux vertèbres.

Les blessures spinales liées à la pêche à l'électricité peuvent apparaître n'importe où le long de la colonne vertébrale, y compris derrière la tête, même si la majorité des blessures sont observées sur la partie centrale ou postérieure de la colonne vertébrale. La localisation de ces blessures varie en fonction des espèces. Chez les Salmonidés, les blessures spinales sont localisées le plus souvent proches ou entre les nageoires dorsales, pelviennes et la nageoire anale (Hollender et Carline, 1994; Sharber et Carothers, 1988); alors que pour les Centrarchidés et les Ictaluridés elles sont plutôt localisées dans la région caudale en arrière de l'orifice uro-génital (Spencer, 1967). Parmi les *Xyrauchen texanus* (Abbott, 1860) soumis à un champ électrique, la plupart des blessés ont montré des hémorragies spinales proches de la base de la nageoire dorsale (Muth et Ruppert, 1996). Grisak (1996) a noté que la plupart des dommages spinaux et hémorragies causés sur des Hiodon alosoides (Rafinesque, 1819) et des poissons cypriniformes apparaissent dans les parties moyennes et postérieures du corps.

Le nombre de vertèbres impactées est variable de 1 à 20, il dépend de l'espèce et de la sévérité de l'exposition (intensité du champ, temps d'exposition, forme du courant). Par exemple Grisak (1996) a noté que la plupart des blessures spinales impliquait de 3 à 9 vertèbres. Hollender et Carline (1994) ont repéré que la majorité des blessures spinales chez l'omble de fontaine soumis à de l'AC et du PDC impliquait de 2 à 18 vertèbres.

Ainslie *et al.* (1998) ont analysé l'impact du DC et du PDC (30 Hz et 12 %) sur des juvéniles de truite arc-en-ciel. Ils ont montré qu'environ 60 % des anomalies vertébrales sont antérieures à la position de la nageoire dorsale et que la vertèbre 21 est la plus souvent lésée. Les bandes sombres visibles sur la peau des juvéniles de truite ont une position postérieure à la majorité des blessures spinales.

Après exposition à du PDC (50 Hz et 10 %, gradient de tension à $0,18 \text{ V.cm}^{-1}$) et de la Rafale de PDC (3 pics de 2 ms espacés de 2,1 ms avec une fréquence de 15 Hz, gradient de tension à $0,12\text{-}0,22 \text{ V.cm}^{-1}$), et au bout de 250 jours, les *Oncorhynchus clarki lewisi* (G. Suckley, 1856) présentent un pourcentage de blessures supérieur (30,5 % et 26,8 % respectivement pour le Burst PDC et le PDC) à des truites qui n'ont pas été exposées à un champ électrique (Dwyer *et al.*, 2001). Néanmoins les *Oncorhynchus clarki lewisi* préalablement exposées à du DC ne présentent pas de différence de blessures spinales (en pourcentage) par rapport aux truites témoins.

4.1.2 L'activité cardiaque

Parmi les blessures non spinales, la plus extrême serait l'électrocution lorsque les poissons sont exposés à de forts gradients de tension. Cependant l'exposition des poissons à de fortes tensions est généralement rare. Taylor *et al.* (1957) ont observé une arythmie cardiaque: une pulsation suivie de laps de temps sans battements et la reprise rapide d'un rythme normal même si le courant (DC) est encore appliqué. Ils en ont conclu que le cœur n'est pas sévèrement affecté par les courants lors d'une pêche à l'électricité. Par contre, dans les expériences de Schreck *et al.* (1976), la récupération de l'activité cardiaque normale est plus longue, de l'ordre de 4-5 minutes, après avoir exposé des truites arc-en-ciel à du DC (350 V et 0,6 A) durant 15 ou 45 secondes.

4.1.3 L'activité respiratoire

La défaillance de la respiration est considérée comme la cause principale de la mortalité lorsque les poissons sont choqués. En effet l'activité respiratoire peut être réduite chez les poissons étant partiellement en état de narcose et peut s'arrêter lorsqu'ils sont en état de narcose ou tétanisés. Les poissons qui sont choqués mais qui ne se rapprochent pas assez rapidement de l'anode vont plus facilement mourir d'asphyxie. Schreck *et al.* (1976) ont observé qu'après la coupure du courant, les truites arc-en-ciel tétanisées ne retrouvent pas une activité respiratoire normale avant 60 secondes ou « toussent » violemment les 30 premières secondes qui suivent l'arrêt du courant. Le défaut de respiration chez les anguilles, et possiblement chez d'autres espèces, peut aussi être dû à une suffocation suite à un excès de mucus produit par les branchies lorsqu'elles sont sous l'influence du champ électrique (Lamarque 1990a). Mitton & McDonald (1994a) ont exposé des truites arc-en-ciel à du PDC (200 V et 600 V, 60 Hz et 30 % de rapport cyclique) durant 20 secondes. Après l'arrêt du courant, ils ont noté une récupération de la ventilation au bout de 19 secondes en moyenne et jusqu'à 3 minutes. Ces résultats sont plutôt similaires avec ceux de Schreck *et al.* (1976).

4.1.4 Les organes viscéraux

Les organes viscéraux peuvent être aussi affectés. Mariott (1973) a décrit que deux femelles de saumon pink (*Oncorhynchus gorbusha*, Walbaum, 1792) ont eu une rupture des organes internes suite à une exposition de AC (110 V, 60 Hz). Il suppose qu'il s'agit du résultat de sévères contractions musculaires. Cependant Taylor *et al.* (1957)

ont comparé l'état de tissus de plusieurs organes provenant de truites arc-en-ciel soumises ou non à l'électricité et n'ont pas noté de différences.

4.1.5 La croissance

Certaines formes de courant peuvent affecter la croissance à long terme (Dwyer *et al.*, 2001). Cent dix jours après exposition à du PDC (50 Hz et 10 %, gradient de tension de $0,18 \text{ V.cm}^{-1}$) et du Burst PDC (3 pics de 2 ms espacés de 2,1 ms avec une fréquence de 15 Hz, gradient de tension à $0,12\text{-}0,22 \text{ V.cm}^{-1}$), les truites fardées gagnent moins de poids que celles qui n'ont pas été soumises à un champ électrique. Deux cent cinquante jours après exposition au champ électrique, ces truites et celles qui avaient été exposées à un gradient de tension plus fort de DC ($1,4 \text{ V.cm}^{-1}$), ont également gagné moins de poids que les truites témoins. Le fait d'appliquer un champ électrique répété sur des individus peut aussi affecter leur croissance (Gatz et Adams, 1987). Des hybrides de perches ont subi une électrisation avec du PDC (400 V et 120 Hz), toutes les une, deux ou quatre semaines. La croissance relative a ensuite été mesurée, il s'avère qu'une hausse de la fréquence des électrisations a induit une réduction de la croissance sur une période mesurée de 3 mois. Des truites (fario et arc-en-ciel) électrisées plusieurs fois (2 à 7 fois) sur une année avec du PDC présentent un taux de croissance inférieur à celui d'autres truites non électrisées (Gatz *et al.*, 1986). Cette diminution du taux de croissance, 2,5 mois après l'électrisation, apparaît plus fréquemment chez les individus d'âge 1+ et 2+ que ceux d'âge $\geq 3+$.

4.1.6 Les œufs de poisson

D'après les expériences de Dwyer et Erdahl (1995), le niveau de la tension délivrée est le facteur le plus impactant sur la mortalité des œufs de truite fardée. Ils ont observé des taux de mortalité pouvant atteindre 99 %. Muth et Ruppert (1997) ont exposé des embryons de *Xyrauchen texanus* de différents stades de développement à différents niveaux de gradients de tension (1,2 ; 5 et 10 V.cm^{-1}). Ils ont montré que tous ces gradients de tension peuvent blesser les embryons. La survie de ces derniers est augmentée à chaque niveau de développement. D'un autre côté Bohl *et al.* (2010) ont trouvé que la vulnérabilité d'embryons de poissons aux blessures induites par un champ électrique augmente en fonction de leur taille, indépendamment de leur espèce. Cho *et al.* (2002) ont démontré que des femelles matures de *Oncorhynchus tshawytscha* (Walbaum, 1792) soumises à un champ électrique peuvent présenter jusqu'à 93 % de mortalité de leurs œufs. Roach (1999) a montré que les œufs qui montrent le plus fort taux de mortalité sont ceux soumis aux plus forts gradients de tension de son étude ($1,30\text{-}1,50 \text{ V.cm}^{-1}$), qui correspondent à la proximité de l'électrode lors d'application sur le terrain. Mariott (1973) a observé que l'application d'un champ électrique (110 V, 60 Hz AC) sur des *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum, 1792) mâles et matures n'a pas d'effet négatif sur la survie des œufs fécondés par ces mâles alors que le fait de choquer des femelles matures augmente la mortalité des œufs.

4.1.7 Le stress et le comportement

Concernant l'état physiologique des poissons, Schreck *et al.* (1976) ont noté une croissance immédiate de la concentration en corticoïdes plasmatiques (hormones surrénales, stéroïdes), en lactate (issu de l'activité anaérobie des muscles), en thrombocytes (également nommés plaquettes sanguines, impliquées dans la coagulation du sang) chez les truites arc-en-ciel après exposition au DC. Mitton & McDonald (1994a) ont trouvé que la concentration de cortisol plasmatique d'une truite arc-en-ciel augmente de plus du double de la concentration normale et que celle de lactate s'accroît de six fois environ la première heure après exposition au PDC (200 V et 600 V, 60 Hz et 30 % de rapport cyclique) et qu'elle revient au niveau de repos au bout de 8 heures. Arnekleiv *et al.* (2004) ont aussi mesuré la concentration en cortisol et en glucose des truites fario après les avoir capturées à l'aide d'engins de pêche à l'électricité, transportées et manipulées. Le taux de cortisol a augmenté significativement et retourne à des valeurs de repos vers les 72 heures. La récupération physiologique complète peut nécessiter plus de six heures pour une truite arc-en-ciel ayant subi un choc électrique (Schreck *et al.*, 1976). Ces résultats sont en accord avec ceux de Cho *et al.* (2002), qui ont montré que des juvéniles de *Oncorhynchus tshawytscha* (Walbaum, 1792) soumis à un champ électrique présentent un retour du taux de cortisol normal plus lent comparés à ceux qui n'ont pas été exposés à ce champ. Ajouté à cela, ils présentent une plus forte réponse de production de glucose par rapport à ceux qui n'ont pas été exposés. Beaumont *et al.* (2000) ont trouvé que les niveaux de cortisol dans le plasma de truites arc-en-ciel choquées à l'électricité par différentes formes de courant étaient considérablement élevés (7 fois plus environ) par rapport à des niveaux de base. Chacune des formes de courant ont induit une même hausse de ce taux de cortisol. Mitton & McDonald (1994) ont aussi souligné que pour les salmonidés, la réponse physiologique à la pêche à l'électricité est équivalente en magnitude à celle induite par d'autres facteurs de stress comme la manipulation ou la pêche à la ligne. Mesa et Schreck (1989) ont trouvé qu'il n'y a pas de différence de stress chez les truites arc-en-ciel entre celles qui ont été manipulées 30 secondes et celles qui ont été soumises au DC (500V) durant 8 secondes. D'un autre côté, Barton et Dwyer (1997) ont montré que le stress causé par la pêche à l'électricité est significativement supérieur que celui causé par la manipulation.

Les stress peuvent être cumulés. Par exemple, le stress lié à la pêche à l'électricité peut être ajouté à des stress environnementaux comme une pollution, ce qui peut augmenter la mortalité (Wydoski, 1980).

La pêche à l'électricité peut aussi affecter le comportement des poissons. Mesa et Schreck (1989) ont observé que les taux d'alimentation et d'agression diminuent chez les truites fario juste après avoir été soumises à la pêche à l'électricité. Dans les cours d'eau naturels, les truites sauvages pêchées à l'électricité et marquées cherchent immédiatement une cache et demeurent inactives. Elles ne mangent pas et sont facilement approchables par des plongeurs. Une moyenne de 3-4 heures est nécessaire pour que 50 % des poissons reviennent à leur état normal (Mesa et Schreck, 1989). Concernant des truites juvéniles exposées 20 secondes au PDC (200 V et 600 V, 60 Hz et 30 % de rapport cyclique), Mitton et McDonald (1994b) ont montré une réduction de la nage. Cette performance est comparable à celle de truites ayant nagé cinq minutes auparavant. Siepker *et al.* (2006) ont observé que 41 % des mâles de black-bass abandonnent la garde de leur nid lorsqu'ils ont été soumis à une capture à l'aide de la pêche à l'électricité contre seulement 9,5 % des mâles qui n'ont pas subi de captures.

4.1.8 La robustesse et la sensibilité des poissons

Certaines espèces sont réputées plus ou moins sensibles aux effets d'un champ électrique.

La vulnérabilité à la pêche à l'électricité varie selon les espèces du fait de leurs différences anatomiques. Des espèces qui possèdent de grandes et épaisses écailles (comme la carpe commune), sont plus protégées de la pénétration de l'énergie électrique (Reynolds, 1983 dans Emery, 1984). D'autres comme le poisson-chat, n'ont pas d'écaille pour se protéger. Pottier *et al.* (2016) ont remarqué que les salmonidés ont l'air d'être sensibles à l'exposition du champ électrique alors que les anguilles sont probablement plus robustes (Figure 45).

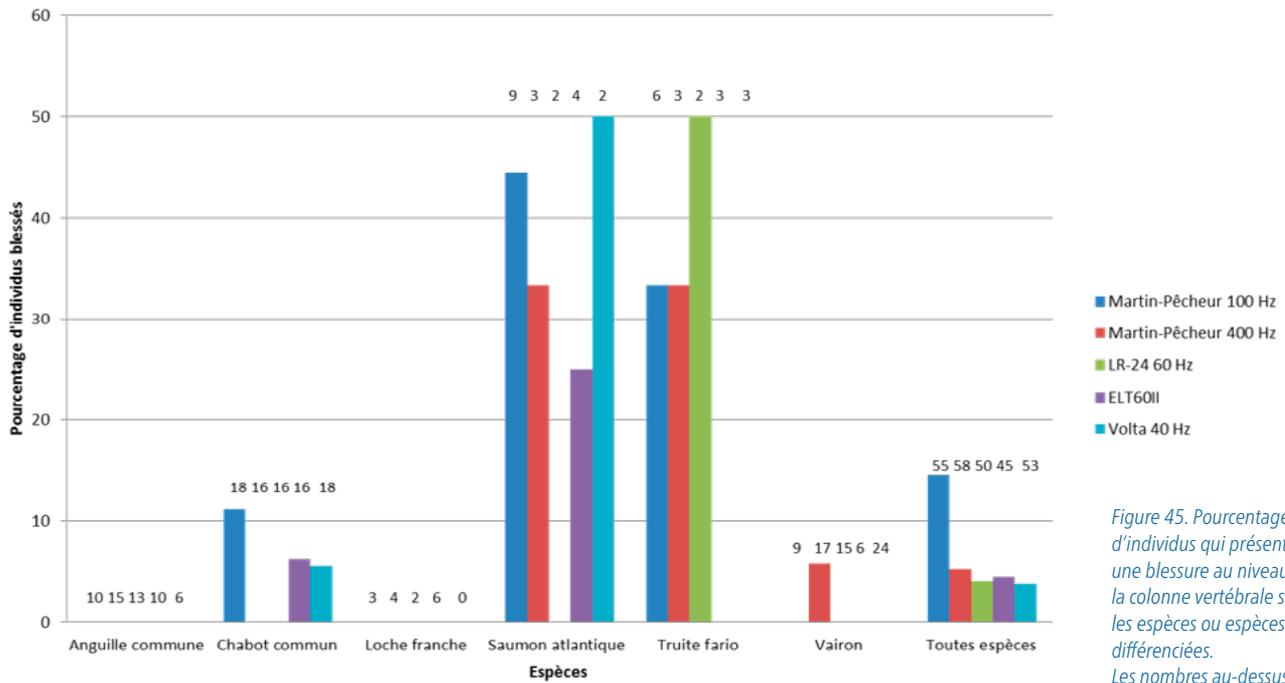


Figure 45. Pourcentage d'individus qui présentent une blessure au niveau de la colonne vertébrale selon les espèces ou espèces non différenciées. Les nombres au-dessus des barres indiquent la taille des échantillons analysés. Source: Pottier *et al.* (2016).

4.2 L'intensité du champ électrique

La létalité du champ électrique lors de la pêche augmente généralement lorsque l'intensité du champ électrique s'accroît (gradient de tension, densité de courant, densité de puissance). Les effets physiologiques létaux de l'intensité des champs électriques sont en fonction du différentiel de tension qui traverse le poisson et donc de l'orientation du poisson face aux lignes de courant (Snyder, 2003a). Contrairement à la mortalité, il n'y a pas de relation établie entre les blessures induites par la pêche à l'électricité et le niveau de champ électrique. Cependant les blessures spinales pourraient apparaître dès la zone de perception du poisson (Snyder, 2003a). L'effet de l'intensité du champ électrique sur la mortalité a été exposé par Lamarque (1990a). Des truites arc-en-ciel ont été placées

durant 20 secondes à divers types de courant (DC, AC et PDC) à des distances de 20 cm ou 50 cm de l'anode. À 20 cm, où le gradient de tension est largement supérieur, il a observé les taux de mortalité pour tous les types de courant utilisés, ils varient de 6 à 93 %. À 50 centimètres de l'anode, les mortalités ne sont observées que pour un seul type de courant : l'AC. Il induit un pourcentage de mortalité de 27 % à 50 cm et de 87 % à 20 cm de l'anode.

4.3 La forme du courant

4.3.1 La forme de la longueur d'onde

Plusieurs études ont été menées afin d'évaluer l'impact de la forme de la longueur d'onde sur la physiologie des poissons (Bird et Cowx, 1993; Sharber et Carothers, 1988).

Bird et Cowx (1993) ont exposé des carassins à du DC et à plusieurs formes de PDC (différents rapports cycliques et différences fréquences avec un pic de tension fixé à $1,1 \text{ V.cm}^{-1}$). Ils ont noté que la récupération de l'activité respiratoire est immédiate après exposition au DC et varie de 4 à 45 secondes après exposition à différents types de PDC. Le temps de récupération des poissons soumis à 10 % ou 90 % de rapport cyclique est maximal à des fréquences intermédiaires (30 à 100 Hz) mais il chute brusquement à de hautes fréquences (400 et 600 Hz). Le temps de récupération lorsque le rapport cyclique est réglé à 50 % est relativement long à toutes les fréquences testées.

Sharber et Carothers (1988) ont mis en évidence un classement des formes de longueur d'onde en fonction du pourcentage de truites arc-en-ciel blessées. Les formes exponentielles, en créneaux et $\frac{1}{4}$ de sinusoïde induisent respectivement chacune 44 %, 44 % et 67 % d'individus blessés. De plus Bird et Cowx (1993) ont montré qu'une carpe soumise au courant de la forme $\frac{1}{4}$ de sinusoïde met plus de temps pour récupérer (45 secondes environ) que lorsqu'elle est soumise à des formes exponentielles ou crénelées (30 secondes environ).

La forme de PDC (30 Hz 12 %) induit plus de blessures spinales que le DC lors d'un passage de pêche sur des juvéniles de truites arc-en-ciel et le fait de pratiquer trois passages de pêche cause plus de blessures spinales que le fait de n'en effectuer qu'un seul (Ainslie *et al.*, 1998).

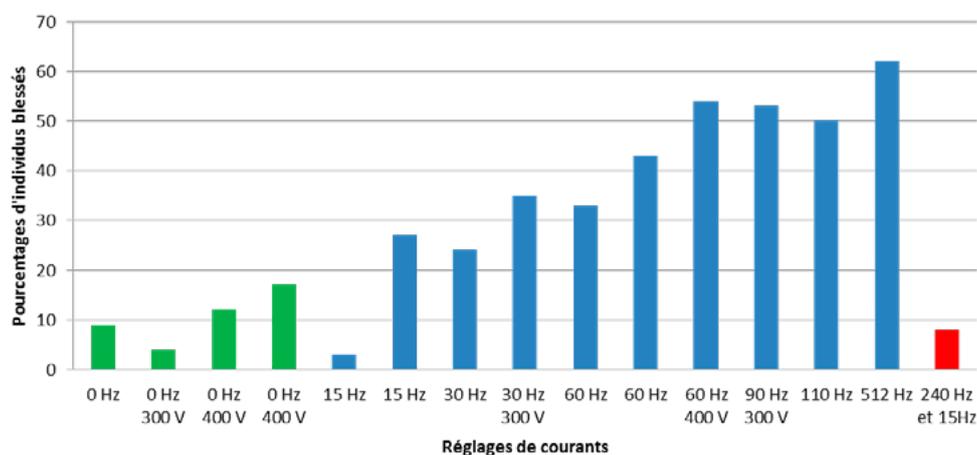
Kynard et Lonsdale (1975) ont montré que l'application du DC ($\sim 0,25 \text{ V.cm}^{-1}$) sur des truites arc-en-ciel n'a pas d'influence sur leur croissance. Barrett et Grossman (1988) ont exposé des chabots tachetés 5 fois à du DC (600 V) de façon hebdomadaire. Au bout de 30 jours, ils n'ont pas observé de différences entre le taux de mortalité de ceux qui ont été électrisés et les témoins non-électrisés. Ils suggèrent que le stress dû à la manipulation est plus déterminant pour le taux de mortalité que l'exposition à un champ électrique.

4.3.2 La fréquence

De nombreuses études s'accordent sur le fait qu'au-delà de 15 Hz, le niveau des blessures augmente considérablement (Cooke *et al.*, 1998; Dolan *et al.*, 2002; Sharber *et al.*, 1994; Snyder, 2003a) (Figure 46). Sharber *et al.* (1994) ont émis l'hypothèse que la plupart des blessures apparaissent lors de l'utilisation de hautes fréquences. Ces dommages sont causés par des spasmes myocloniques associés aux chocs des captures. Certains de ces spasmes sont développés plus rapidement lorsque la fréquence du courant augmente. Whaley *et al.* (1978) ont trouvé que le pourcentage de mortalité de poissons (*Etheostoma flabellare* et *Lepomis macrochirus*) exposés à du PDC augmente

lorsque la fréquence du signal augmente mais aussi avec la durée d'exposition. Dolan *et al.* (2002) ont exposé des perches à du DC et différents réglages de PDC. Ils ont trouvé que le DC est moins impactant que le PDC. De plus l'incidence des hémorragies et des blessures spinales semblerait liée à la fréquence des pulsations, avec des hautes fréquences conduisant à plus de blessures, et des faibles fréquences ou du DC à peu de blessures.

Figure 46. Pourcentage d'individus blessés en fonction de différentes fréquences (en Hertz) provoquées avec un courant continu (0 Hz) et du courant pulsé crénelé (PDC).
■ DC
■ PDC crénelé
■ CPS (burst PDC): 240 Hz est la fréquence à l'intérieur du motif et 15 Hz est celle de la répétition du motif.
D'après les données de Dalbey *et al.* (1996), Dolan *et al.* (2002), McMichael (1993) et Sharber *et al.* (1994).



4.3.3 Le rapport cyclique et la durée des pulsations

Dolan et Miranda (2004) ont démontré qu'en conditions contrôlées, l'incidence des blessures et des mortalités due à la pêche à l'électricité dépend de la taille des poissons, de l'espèce et du rapport cyclique. Il existe une covariance négative entre le pourcentage du rapport cyclique et celui des blessures spinales ainsi que celui de la mortalité. Si le rapport cyclique diminue, une densité de puissance supérieure est requise pour immobiliser les poissons, elle peut donc être suffisamment forte pour causer des blessures qui peuvent être létales.

4.4 La détection et l'évaluation des blessures

Pour évaluer le taux d'incidence et la sévérité des blessures spinales, il est possible d'utiliser les critères proposés par J.B Reynolds (dans Hollender et Carline, 1994) (Tableau 6 page 58). Ces critères permettent une documentation standardisée de la présence et de la sévérité des dommages sur la colonne vertébrale et des hémorragies qui y sont associées.

Selon ces critères, les dommages vertébraux (généralement visualisés par rayons X) et les hémorragies (mises en valeur des muscles le long de la colonne vertébrale via une dissection) sont séparément notés de 0 à 3 selon leur sévérité. Depuis l'introduction de cette notation plusieurs chercheurs l'ont utilisée (Dalbey *et al.*, 1996; Hollender et Carline, 1994). Fredenberg (1992 dans Snyder, 2003a) a utilisé ces critères et a noté que même si des hémorragies étaient observées dans certains cas, il n'a pas observé de correspondance avec les dommages vertébraux et vice versa. Les taux de sévérité des dommages de la colonne vertébrale et des hémorragies sont tout de même raisonnablement similaires, et les blessures sévères sont presque toujours détectées pour les deux cas.

Des bandes sombres, référées à des ecchymoses ou des brûlures peuvent être des indications de blessures. Lamarque (1990a) a noté que certaines de ces bandes peuvent être de vraies brûlures provenant d'un contact direct avec l'anode. Sharber et Black (1999) ont suggéré que la plupart de ces bandes sont une décoloration de la peau suite à une dilatation des mélanophores. Lamarque (1990a) a suggéré que si une grande partie de corps devenait sombre, la rupture totale de la colonne vertébrale était fortement probable.

Les bandes résultant des hémorragies sous-cutanées permettent une bonne approximation de la localisation des dommages vertébraux et des tissus associés (Lamarque, 1990a; Fredenberg 1992, dans Snyder, 2003a), mais leur absence n'indique pas l'absence de blessures.

McMichael & Olson (1991 dans Snyder, 2003a) ont montré une relation positive entre l'incidence des marques sombres et des blessures spinales pour des truites arc-en-ciel soumises à un champ électrique.

Cependant Hollender et Carline (1994) ont conclu qu'une évaluation efficace des blessures spinales et des hémorragies musculaires doit être basée sur une analyse aux rayons X (Figure 47) combinée à une nécropsie.

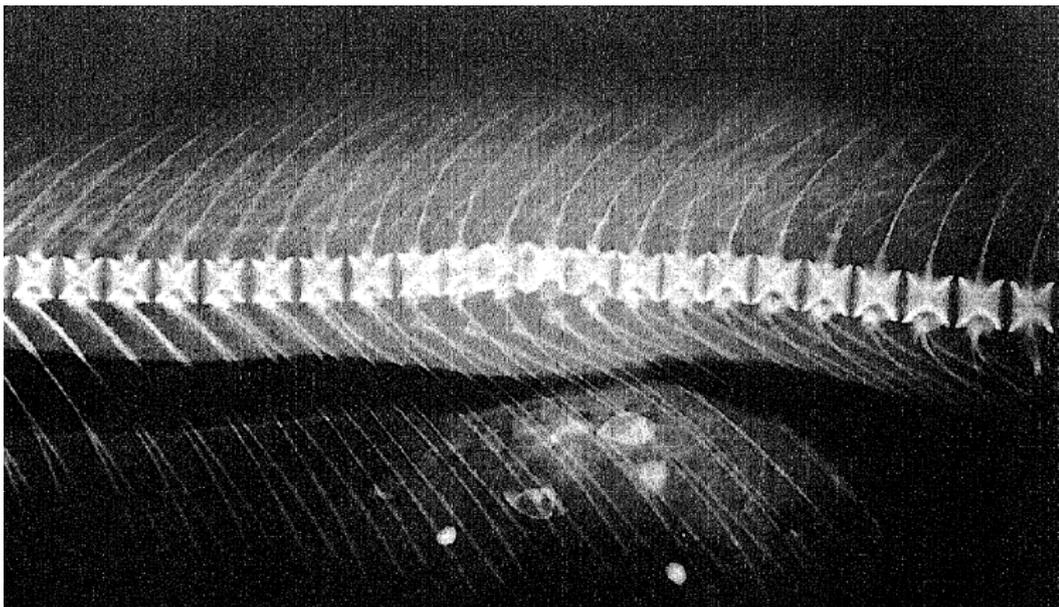
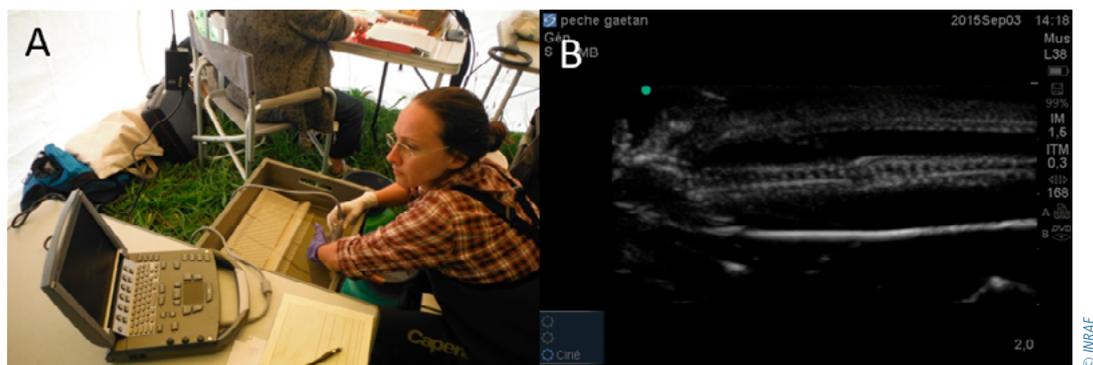


Figure 47. Radiographie d'une truite arc-en-ciel montrant des vertèbres compressées et fracturées (au centre de la photographie). Des petits os sont aussi détachés au niveau de la blessure.

© Sharber et al. (1994)

Une alternative moins intrusive pour évaluer les blessures liées à la colonne vertébrale est l'échographie. Il existe des échographes de terrains qui permettent d'obtenir des images nettes du squelette des poissons et de certains organes (Figure 48). Cette méthode présente les avantages d'être applicable *in situ* et rapide à mettre en place (une échographie peut durer 10 secondes). Cependant elle ne permet pas de visualiser les hémorragies internes.

Figure 48. Manipulation de l'échographe sur un salmonidé (A) et échographie résultante montrant une compression des vertèbres au centre (B).



4.5 L'essentiel à retenir

La pêche à l'électricité peut induire plusieurs types d'impact sur les poissons :

- des blessures liées à la colonne vertébrale : compression, désalignement, fracture de vertèbres, rupture de l'artère dorsale et des arcs aortiques ;
- lésion des organes viscéraux ;
- modification du rythme cardiaque et de l'activité respiratoire ;
- diminution de la croissance des individus ;
- modifications physiologiques : croissance de la concentration en corticoïdes, en lactate et en thrombocytes.
- modification du comportement : diminution de l'alimentation, de l'agressivité et de la nage.

La sévérité et l'occurrence des blessures peuvent dépendre de :

- l'intensité du champ électrique : plus un poisson est soumis à un champ électrique fort, plus les risques de blessure et de mortalité augmentent ;
- la forme du courant : le DC est moins impactant que les formes de courant pulsées ;
- la fréquence lors de l'utilisation de courant pulsé : plus la fréquence augmente, plus le risque d'impact des poissons augmente.

Plusieurs méthodes permettent de détecter les blessures :

- la dissection permet de mettre en évidence les possibles hémorragies internes et la lésion des organes viscéraux. Cette méthode est invasive car elle nécessite la mise à mort des individus ;
- la radiographie permet de mettre en évidence les lésions de la colonne vertébrale mais cette méthode est invasive du fait des radiations ;
- l'échographie permet de mettre en évidence les lésions de la colonne vertébrale et elle n'est pas invasive.

Il existe un système semi-quantitatif d'évaluation de la sévérité des blessures (Tableau 6).

Tableau 6. Système d'évaluation des blessures utilisé pour identifier et classer la sévérité des blessures provoquées par la pêche à l'électricité, repris de J.B Reynolds (Alaska Cooperative Fish and Wildlife Research Unit, communication personnelle dans Hollender et Carline (1994))

Classes d'évaluations	Hémorragie interne	Dommage vertébral
0	Non apparente	Non apparente
1	Plaies séparées de la colonne	Compression des vertèbres
2	Plaies sur la colonne \leq largeur de 2 vertèbres	Désalignement et compression des vertèbres
3	Plaies sur la colonne $>$ largeur de 2 vertèbres	Fracture de \geq 1 vertèbre ou séparation complète de \geq 2 vertèbres

5 Les facteurs qui influent sur l'efficacité de pêche

5.1 Les facteurs biotiques

5.1.1 Les espèces de poisson

Certaines espèces sont réputées pour être facilement capturables et d'autres plus difficiles à pêcher. Une des explications serait la différence de conductivité du poisson et de celle de l'eau (voir partie 4.3). Le comportement du poisson, lorsqu'il est surpris par le champ électrique et le type d'habitat lors de la capture, peuvent aussi influencer l'efficacité de la pêche. Les anguilles sont considérées comme une espèce difficile à capturer: Lambert *et al.* (1994) ont montré que les probabilités de capture sont variables lors de captures successives avec retrait des individus et donc l'estimation des individus peut être erronée. De plus quelques espèces benthiques sont difficiles à capturer, en particulier les espèces qui plongent vers le substrat lorsqu'elles sont choquées (Zalewski et Cowx, 1990).

Vehanen *et al.* (2013) ont évalué l'efficacité de pêche pour la totalité des 3 pêches successives de 26 espèces de poissons. L'efficacité varie de 57,1 % à 100 %, exceptée pour deux espèces où elle est de 0 %.

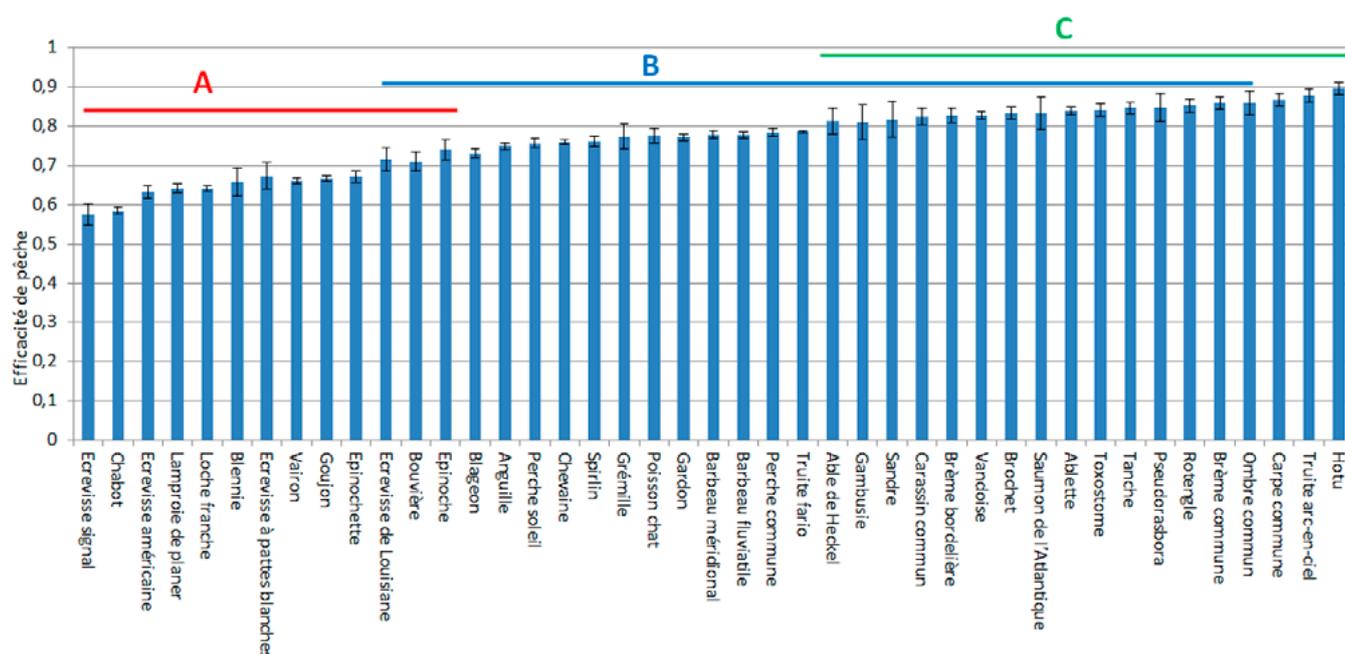
Pottier (2014) a voulu mettre en évidence les facteurs environnementaux qui pourraient influencer sur l'efficacité de la pêche à l'électricité pour deux et trois pêches successives de la base de données sur les milieux aquatiques et les poissons (BDMAP, Poulet *et al.* 2011) développée par l'OFB. Cette base rassemble toutes les données sur les milieux aquatiques et notamment les résultats des pêches depuis 1977. Seuls les cours d'eau guéables ont été considérés. Il s'avère que le facteur qui influe essentiellement sur l'efficacité de la pêche à l'électricité est l'espèce ciblée.

L'efficacité de pêche est différente selon les espèces ciblées (Figure 49). Elles ont été séparées en plusieurs catégories d'espèces selon leur efficacité de capture :

- les espèces de faible efficacité de capture, appartenant uniquement au groupe A;
- les espèces de faible efficacité de capture à tendance moyenne, appartenant aux groupes A et B;
- les espèces de moyenne efficacité de capture, appartenant uniquement au groupe B;
- les espèces de moyenne efficacité de capture à tendance forte, appartenant aux groupes B et C;
- les espèces de forte efficacité de capture, appartenant uniquement au groupe C.

Figure 49. Efficacité de pêche en fonction des espèces de poissons capturées. Les différences significatives (test post-hoc selon la procédure de Steel-Dwass-Critchlow-Fligner, $p\text{-value} < 0,05$) sont marquées d'une lettre différente (A, B ou C). Barres d'erreur: erreur standard.

Source: Pottier (2014).



5.1.2 Le nombre de poissons présents

Lors de l'utilisation d'estimation de la population à l'aide de méthodes de retrait des individus (Carle et Strub, 1978; De Lury, 1951), l'efficacité de pêche peut varier entre des sites comme entre différentes périodes de prospection sur un même site.

Zalewski (1983) a comparé l'efficacité de capture d'une population de vairons obtenue par capture par déplétion dans un petit cours d'eau et à différentes densités. À une faible densité (66-147 individus.100m⁻¹) il a obtenu 70-80 % d'efficacité lors du premier passage. Lorsque la population a doublé en nombre, l'efficacité a baissé à 35 % et 20 % pour les adultes et les juvéniles respectivement. Mais à de fortes densités (599-2478 individus.100m⁻¹) l'efficacité totale augmente à 60 %.

5.1.3 La taille et la forme du poisson

Il est largement admis que la longueur du poisson est le premier facteur qui influe sur la probabilité de capture lors d'une pêche à l'électricité (Zalewski et Cowx, 1990). En général, plus un poisson est long, plus il est facile à attraper. Ce phénomène peut être expliqué par la loi de Rushton (1927 dans Lamarque, 1990a) relative à la longueur des nerfs: le potentiel du corps augmente avec la longueur du corps, ce qui amène à une meilleure stimulation électrique des nerfs les plus longs du poisson. Cependant, Lamarque (1990a) a souligné que les nerfs des poissons ont une taille maximale de quatre centimètres donc ce phénomène ne concerne que les poissons dont les nerfs ont une longueur inférieure à quatre centimètres. Le seuil de tension pour induire une galvanonarcose est plus bas pour un grand poisson donc plus facilement atteint en situation pratique.

D'un autre côté, un poisson plus gros a un meilleur impact visuel sur l'opérateur que des individus plus petits, facilitant sa capture. Une relation mathématique (Équation 26) a été établie par Zalewski (1983) entre le logarithme du poids et l'efficacité de capture pour la première pêche. La population totale en place a été contrôlée à l'aide de roténone (Figure 50). Cette relation est empirique pour des rivières naturelles comportant une forte richesse spécifique et dont la largeur est inférieure à 15 mètres.

$$\%capture = 7,201 + 20,461 \times \text{Log}_{10}(\text{Poids}) ; r = 0,830 (P < 0,01) \quad \text{Équation 26}$$

Dolan et Miranda (2003) ont étudié l'influence du volume du poisson sur le seuil de densité de puissance requise pour induire une immobilisation. Leurs résultats ont montré que la taille du poisson est une variable clé qui contrôle le seuil d'immobilisation mais que le volume du poisson est le meilleur descripteur lié à cette immobilisation.

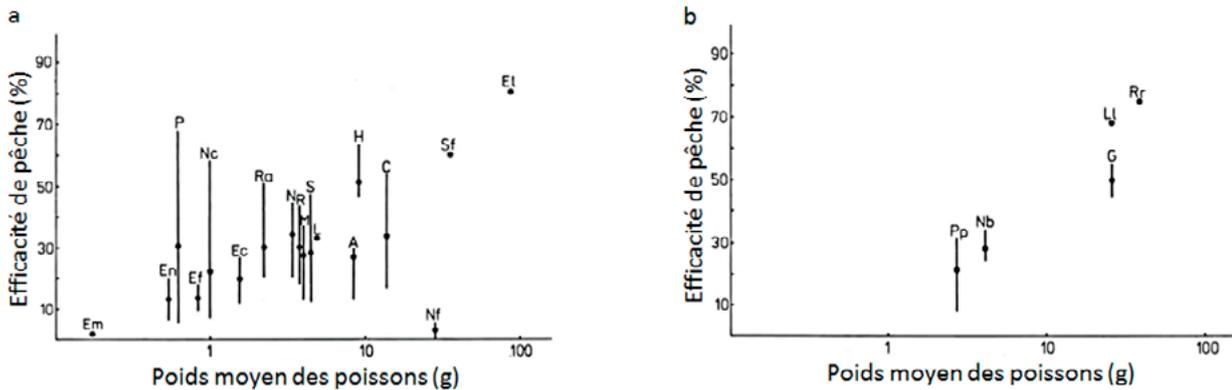


Figure 50. Relations entre le poids moyen de spécimens et le pourcentage de poissons capturés durant la première pêche. Les lignes verticales indiquent les valeurs minimales et maximales. a: Canada; b: Pologne. D'après Zalewski, 1983.

- | | | |
|--|---|--|
| Code des espèces | N : Nocomis spp. (Girard), | Sf : Salvelinus fontinalis (Mitchill), |
| Em : Etheostoma microperca (Jordan and Gilbert), | R : Rhinichthys cataracea (Valenciennes), | El : Esox lucius (L), |
| En : Eltheostoma nigrum (Rafinesque), | M : Micropterus dolomieu (Lacepede), | Pp : Phoxinus phoxinus (L), |
| P : Pimephales notatus (Rafinesque), | S : Semotilus atromaculatus (Mitchill), | Nb : Noemacheilus barbatulus (L.), |
| Ef : Etheostoma fl abellare (Rafinesque), | L : Lepomis gibbosus (L), | G : Gobio gobio (L), |
| Nc : Notropis cornutus (Mitchill), | A : Ambloplites rupestris (Rafinesque), | L : Leuciscus leuciscus (L), |
| Ec : Etheostoma caeruleum (Storer), | H : Hypentelium nigricans (Lesueur), | Rr : Rutilus rutilus (L). |
| Ra : Rhinichthys atratulus (Herman), | C : Catostomus comersoni (Lacepede), | |
| | Nf : Notatus fl avus (Rafinesque), | |

5.2 Les facteurs abiotiques

5.2.1 La forme du courant

Dans un chenal expérimental, Beaumont *et al.* (2000) ont évalué l'efficacité de pêche obtenue à l'aide de différentes formes de courants (pulsé exponentiel PEC, pulsé crénelé PDC et rafale de PDC) lors de la capture de truites arc-en-ciel. Ils ont trouvé que les différentes formes de PDC et de rafales de PDC permettent d'obtenir la même efficacité de capture (avec un maximum de 87 %) mais que la forme exponentielle permet une efficacité moyenne significativement inférieure (48 %).

Pottier *et al.* (2015, 2016, 2017) ont comparé *in situ* les captures par unité d'effort (CPUE) obtenues pour des Salmonidés (saumon atlantique et truite fario) et des anguilles européennes. Il s'est avéré que le PEC ne permet pas d'attirer efficacement les poissons ce qui a induit une CPUE de 2 à 3 fois moins élevée pour les salmonidés (Figure 51) et 19 à 30 fois moins pour les anguilles (Figure 52) que celles obtenues à l'aide des autres formes de courant. Par contre, le fait d'utiliser du DC ou autre forme de PDC n'induit pas de différence en termes de CPUE (Figures 51 et 52).

Figure 51 : Capture par unité d'effort (CPUE) de Saumons atlantiques et des Truites fario toutes classes d'âge en fonction des différents engins de pêche à l'électricité utilisés. CPUE: individus/8 secondes d'application du courant dans l'eau. Les différences significatives (Test post-hoc de Tukey, $pvalue < 0,05$) sont marquées d'une lettre différente. Barres d'erreur: erreur standard. Source: Pottier *et al.* (2015).

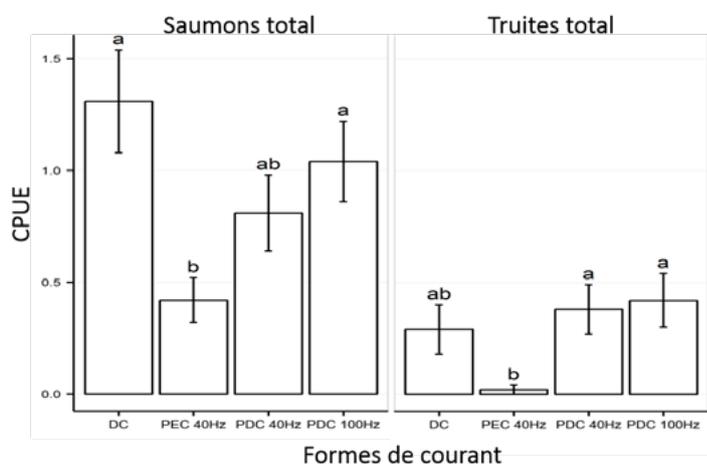
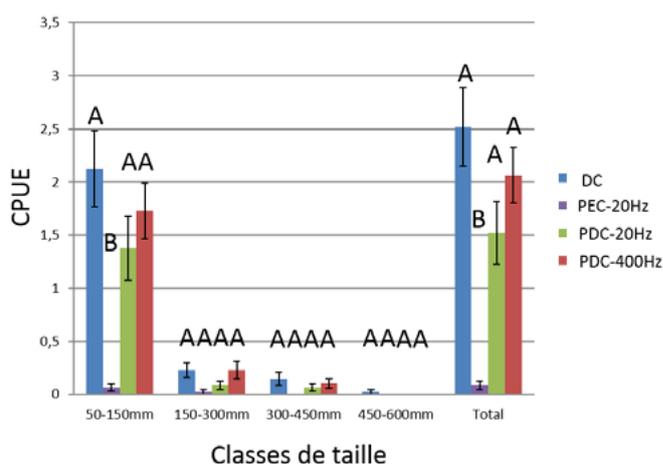


Figure 52. Capture par unité d'échantillonnage (CPUE) d'anguilles de différentes classes de tailles et dans leur totalité, en fonction de différents engins de pêche à l'électricité. CPUEp: individus/point de 30 secondes. Les différences significatives (Test post-hoc de Tukey, $pvalue < 0,05$) sont marquées d'une lettre différente. Barres d'erreur: erreur standard. Source: Pottier *et al.* (2016).



Pottier *et al.*, (2017) ont également comparé les CPUEs obtenues lors de captures par points en ciblant toutes les espèces et en utilisant plusieurs formes de courant (DC, PDC-40 Hz, PDC-100 Hz et PDC-400 Hz). De manière générale, les CPUEs obtenues sont égales pour toutes les espèces quelle que soit la forme de courant utilisée. Par contre le DC est plus efficace pour capturer les anguilles européennes et a tendance à l'être pour la loche franche.

5.2.2 La largeur du site

La caractéristique la plus importante qui affecte l'efficacité de la pêche est la largeur du cours d'eau prospecté (Zalewski et Cowx, 1990). Si le champ électrique n'est pas suffisamment grand pour couvrir toute la largeur de la rivière, les poissons sont capables de s'échapper en contournant ce champ. Kennedy et Strange (1981) ont trouvé une relation négative entre la largeur du cours d'eau et l'efficacité de la pêche avec du PDC concernant des juvéniles de saumons et de truites. Plus la largeur du cours d'eau augmente, plus l'efficacité de pêche diminue (Figure 53).

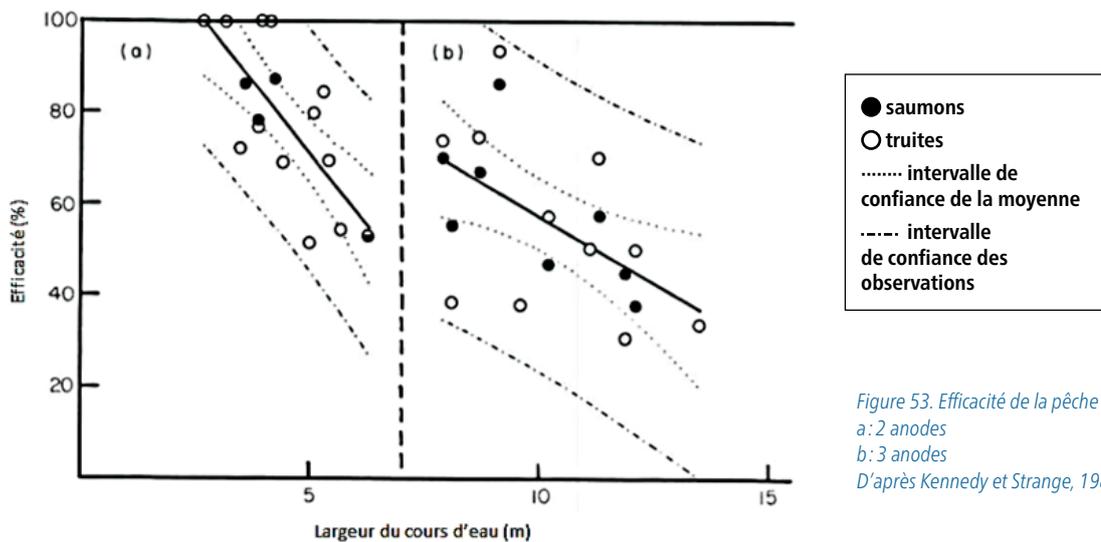


Figure 53. Efficacité de la pêche à l'électricité
a: 2 anodes
b: 3 anodes
D'après Kennedy et Strange, 1981.

5.2.3 La profondeur du cours d'eau

Pour une même tension réglée, Bohlin *et al.* (1989) considèrent que l'efficacité de capture diminue graduellement avec la profondeur. En effet, avec la profondeur, la visibilité du fond du cours d'eau diminue fortement. Les opérateurs vont avoir plus de difficultés pour capturer les espèces benthiques. En outre, le champ d'attraction diminue graduellement en fonction de la profondeur, ce qui favorise la fuite des poissons. Pour compenser, il est possible d'accroître le champ d'attraction. Par contre la puissance de l'appareil sera limitante pour fournir un champ suffisant pour compenser l'augmentation de profondeur.

5.2.4 La transparence de l'eau

Kirkland (1962 dans Zalewski et Cowx, 1990) a montré que les captures de black-bass augmentent de façon exponentielle lorsque la transparence de l'eau augmente. Cependant cette relation entre l'efficacité de pêche et la transparence de l'eau n'est pas aussi simple que ce que suggèrent ces observations. En eau claire, les poissons benthiques et les espèces qui ont un comportement territorial sont relativement faciles à capturer. Toutefois les poissons nectoniques et grégaires ont tendance à garder leurs distances lors de l'approche de bateau (notamment dans les habitats non diversifiés).

À l'inverse, dans les eaux turbides, les poissons de fond bien camouflés et les petits sont difficiles à voir lorsqu'ils sont immobiles.

5.2.5 La température de l'eau

La température influençant le métabolisme, les poissons sont plus actifs à de hautes températures et donc plus difficiles à capturer (Hayes et Baird, 1994). À des températures basses les poissons semblent être plus vulnérables au champ électrique. Ils atteignent plus rapidement l'état d'immobilisation, ce qui réduit l'efficacité de capture. La chronaxie (durée nécessaire pour stimuler une fibre musculaire ou nerveuse) augmente lorsque la température diminue (Lamarque, 1968). Pour conserver une même attractivité de pêche à basse température, il faut augmenter le potentiel ou la durée d'impulsion (Lamarque, 1968).

Regis *et al.* (1981 dans Zalewski et Cowx, 1990) ont démontré une meilleure efficacité pour la tanche à une température de 10,3°C qu'à 19,3°C. À l'inverse Karlstrom (1967 dans Zalewski et Cowx, 1990) a trouvé que la probabilité de capture de tacs de saumons atlantiques et de chabots communs décline avec l'augmentation de température.

En général il apparaît une fourchette de température optimale dans laquelle l'efficacité est meilleure. Pour les salmonidés, elle serait de 0-10°C (Vincent, 1971) voire 5-10°C et 10-20°C pour les cyprinidés (Zalewski et Cowx, 1990). Ces résultats sont dépendants de préférences thermiques des espèces.

5.2.6 L'heure de la pêche

Plusieurs études ont montré qu'il existait une différence entre les taux de capture le jour et ceux de la nuit (McInerny et Cross, 2004; Sanders, 1992). McInerny et Cross (2004) ont montré que la pêche à l'électricité la nuit en lac permettait d'attraper plus d'espèces que le jour, mais que certaines espèces n'étaient contactées que le jour et d'autres uniquement la nuit. Sanders (1992) a trouvé que la pêche à l'électricité de nuit dans de larges rivières permettait de capturer plus d'espèces, d'individus et de biomasse qu'en journée. Sur deux rivières, Sanders (1992) a capturé 43 % et 15 % d'espèces en plus, 62 % et 160 % d'individus en plus et 50 % et 70 % de biomasse en plus la nuit comparée à une pêche à l'électricité de jour. Ces différences de captures sont attribuées aux mouvements nyctéméraux de poissons passant du milieu du cours d'eau vers les berges durant la période crépusculaire (Sanders, 1992).

5.2.7 La conductivité de l'eau

Alabaster et Hartley (1962) ont montré une relation linéaire positive entre l'efficacité de capture et la conductivité. Ils pensaient que la croissance de l'efficacité en fonction de l'augmentation de conductivité dans l'intervalle 70-270 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ était due à une extension du champ électrique des électrodes. Pusey *et al.* (1998) ont trouvé une meilleure efficacité de pêche lors du premier passage sur la rivière Mary (46 %) que sur la rivière Johnstone (37 %). Ils considéraient que cette différence était liée à une plus forte conductivité dans la rivière Mary (621,7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) que celle de la rivière Johnstone (36,8 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Cependant Penczak *et al.* (1997) ont trouvé que les indices d'efficacité de capture ne sont pas significativement corrélés avec l'augmentation de la conductivité, bien que le taux de capture et l'index d'efficacité de capture soient supérieurs aux plus fortes conductivités.

Kolz et Reynolds (1989) ont apporté des informations pour induire un état de narcose chez le carassin doré (Figure 54). D'après leurs résultats, il est nécessaire d'augmenter le gradient de tension significativement pour induire la narcose, notamment lorsque la conductivité se situe en dessous de 100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. De même, Lamarque (1990a) a effectué des tests dans des conductivités se situant entre 10 et 20 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Les meilleurs résultats de capture ont été obtenus lorsque la tension a été augmentée considérablement (800-1650 V).

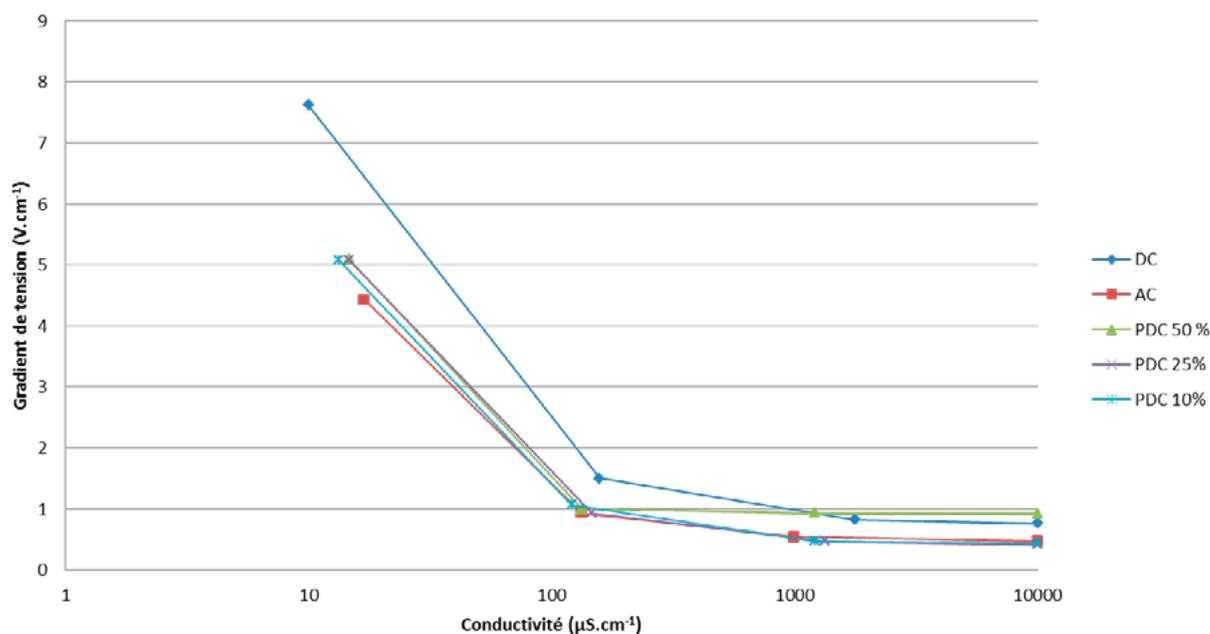


Figure 54. Gradients de tension requis à différentes conductivités de l'eau pour différentes formes de courant (DC, PDC à 50 Hz et AC à 60 Hz) pour induire un état de narcose chez le carassin doré. Les pourcentages liés au PDC correspondent au rapport cyclique. D'après Kolz et Reynolds, 1989.

5.2.8 Le lit de la rivière

Si le substrat du lit de la rivière est extrêmement conducteur (par exemple sédiments salins ou métalliques), il peut court-circuiter l’anode et la cathode. Une forte conductivité des sédiments peut aussi affecter la résistance équivalente des électrodes et notamment celle de la cathode qui repose dessus. Scholten (2003) a évalué l’effet de différents types de substrats sur l’extension du champ électrique autour de l’anode tout en gardant une même conductivité ambiante (Figure 55). Pour les sédiments vaseux, la densité de courant diminue plus fortement induisant une gamme d’attraction plus réduite par rapport à du sable ou des graviers. Il a montré une réduction de 20 à 30 % de la gamme d’attraction en présence de substrat vaseux comparée avec des substrats sableux ou graveleux. Il pense que ce serait dû au changement de la ligne de densité de courant, qui aurait tendance à piquer vers le substrat vaseux dont la conductivité est supérieure à celles du sable ou du gravier.

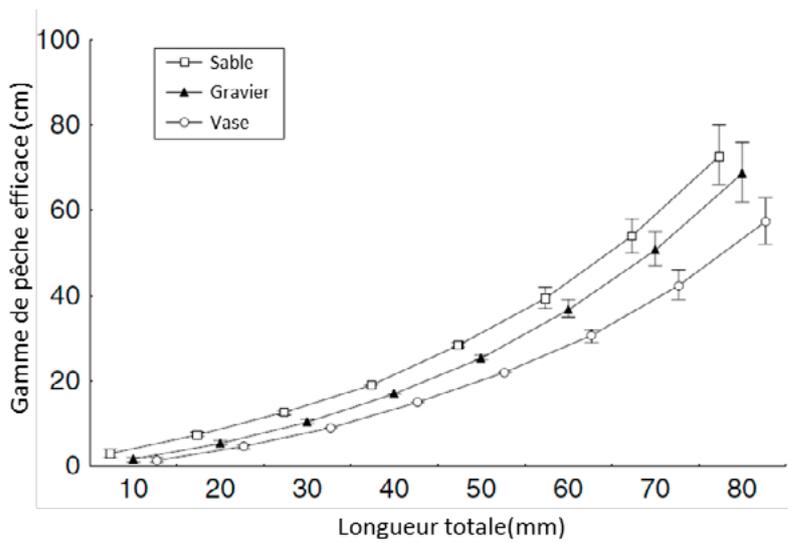


Figure 55. Moyenne et écart-types des gammes efficaces de pêche calculées pour 8 classes de taille différentes de poissons. Le calcul est basé sur les valeurs seuils déterminées par une formule. Pour les trois types de substrat, 4 mesures ont été effectuées séparément. D’après Scholten, 2003.

Ces résultats corroborent ceux de Pottier (2017) qui a démontré que lorsque le substrat est organique, le fait d’en approcher l’anode induit une réduction du champ électrique. De même, le type de substrat où est installée la cathode a des conséquences sur la taille du champ électrique à l’anode. Le fait d’installer la cathode sur un substrat organique va induire une hausse du champ électrique à l’anode et inversement si la cathode est placée sur un substrat inorganique et moins conducteur (Figure 56). Pottier (2017) suggère que le type de substrat où se situe une électrode a influence sur la résistance équivalente de cette dernière.

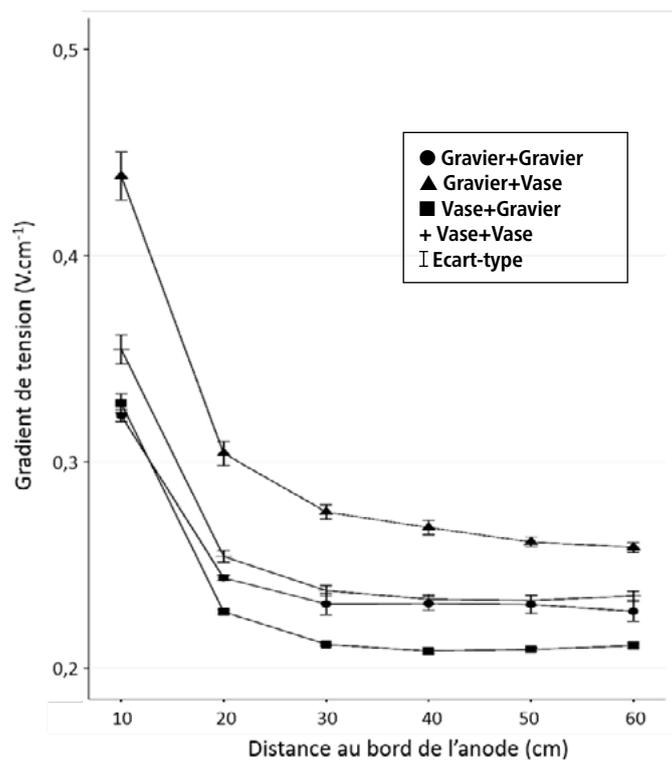


Figure 56. Profil du gradient de tension en fonction du couple de substrat pour l’anode et la cathode, pour une hauteur de l’anode de 10 cm au-dessus du substrat. Les couples de substrats sont indiqués par une forme différente sous la forme substrat anode + substrat cathode. Source : Pottier (2017).

5.3 L'expérience de l'opérateur

Logiquement, une équipe de pêche expérimentée et compétente va capturer plus de poissons qu'une équipe qui l'est moins. Avec l'expérience, les opérateurs sont capables d'analyser la rivière de manière plus pertinente et en même temps de juger où se trouvent les poissons. De même des pêcheurs expérimentés ont une meilleure lecture des veines de courant, ce qui optimise l'action d'amener les poissons dans l'épuisette et le meilleur positionnement de celle-ci. Dans tous les cas, lors de grosses journées, la fatigue des opérateurs peut amener à une diminution de l'efficacité. Les plans d'échantillonnages doivent tenir compte de ces facteurs.

Benejam *et al.* (2012) n'ont pas trouvé de différence sur la richesse spécifique observé et sur la composition des espèces en comparant quatre équipes de pêche sur des cours d'eau guéables. Par contre, ils ont trouvé des différences de captures par unité d'effort (CPUE) en fonction des équipes de pêche.

5.4 L'essentiel à retenir

Deux types de facteurs présentés ci-dessous peuvent avoir une influence sur l'efficacité de la pêche à l'électricité.

Les facteurs biotiques :

- l'espèce de poisson : du fait de la morphologie et du comportement de chaque espèce, l'efficacité de capture est différente ;
- le nombre de poissons présents lors de la pêche ;
- la taille et la forme du poisson : de manière générale, plus un poisson est gros plus il est facilement capturable.

Les facteurs abiotiques :

- la forme du courant : l'utilisation du PEC induit une baisse d'efficacité par rapport à l'utilisation du DC et du PDC ;
- la largeur du site : plus elle augmente, plus l'efficacité de pêche diminue ;
- la profondeur du cours d'eau : plus elle augmente, plus l'efficacité de pêche diminue ;
- la transparence de l'eau : plus elle augmente, plus l'efficacité de pêche augmente ;
- la température : en fonction du préférendum thermique de l'espèce, il apparaît une fourchette de température optimale dans laquelle l'efficacité est meilleure ;
- l'heure de la pêche : en fonction de la période de la journée à laquelle la pêche est effectuée, les espèces capturées et les abondances peuvent différer ;
- la conductivité de l'eau : de manière générale, plus la conductivité augmente, plus l'efficacité de pêche augmente. Cette relation est d'autant plus marquée lorsque la conductivité est inférieure à $100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;
- le type de substrat du lit de la rivière a une influence sur la résistance équivalente des électrodes et donc sur la taille du rayon d'attraction au niveau de l'anode ;
- l'expérience de l'opérateur : logiquement, une équipe expérimentée est plus efficace qu'une équipe novice. La fatigue peut également amener à une diminution de l'efficacité de pêche.

C Mise en œuvre



© Michel Monsay - OFB

6	Conseils de configuration d'engins de pêche à l'électricité	68
7	Moyens de prospection	74
8	Bien-être animal	76
9	Sécurité, réglementation	79
10	Saisie des données	82



6 Conseils de configuration d'engins de pêche à l'électricité

6.1 Les électrodes

Dans les cours d'eau guéables, des anodes en aluminium ou en acier inoxydable sont recommandées du fait de la légèreté du premier matériau et du caractère inoxydable pour le deuxième. Il est recommandé d'utiliser des anodes en forme d'anneau et sans traces d'oxydation. Si ce n'est pas le cas, il est possible de les nettoyer à l'aide de papier de verre. Des anodes trop grandes (40-50 cm de diamètre) ne sont pas forcément nécessaires car elles ne sont pas facilement manipulables. Des diamètres de 30-35 cm permettent une bonne maniabilité.

Pour une même tension réglée, l'utilisation d'une anode de plus petit diamètre permet d'augmenter le potentiel du champ électrique (selon la loi de Kirchoff). Cela permet d'augmenter le caractère attractif du champ électrique. Si la puissance de l'appareil le permet, il est possible d'augmenter le diamètre de l'anode et donc d'augmenter la tension fournie par l'engin de pêche afin d'avoir un rayon d'attraction équivalent et une zone de tétanie réduite.

Pour les cathodes, des tresses de cuivre simples ou des câbles en inox sont recommandés. Les cathodes doivent être bien étalées et non entortillées sur elles-mêmes. Il est important d'ajouter une deuxième cathode ou de doubler la taille de la cathode présente lorsqu'une deuxième anode est ajoutée. Il est recommandé d'utiliser une cathode aussi grande que possible. En revanche, plus la cathode sera grande, plus la demande en puissance sera grande. Une cathode de 150 cm pour un engin portable semble satisfaisante. Pour un engin non portable, une longueur de 300 cm est recommandée.

Si le substrat est extrêmement conducteur (couches salines ou dépôts métalliques), une cathode flottante mais totalement immergée peut être utilisée.

6.2 Le choix du courant

Il faut toujours privilégier le courant continu (DC) au courant pulsé. Le courant continu procure une bonne taxis anodique et la zone de tétanie est proche de l'anode. Ce type de courant est reconnu pour induire un minimum de blessure sur les poissons. Lorsque la conductivité est trop élevée pour la puissance de l'appareil ou lorsque les poissons sont peu réactifs pour une cause inexpliquée, l'utilisation du PDC est possible. Ce type de courant a un fort pouvoir tétanisant qui permet de maintenir les poissons sur place efficacement. En contrepartie, ce fort pouvoir tétanisant fait couler les poissons plus rapidement en profondeur, ce qui ne facilite pas leur capture.

La forme exponentielle de courant pulsé est déconseillée. Elle ne semble pas être efficace par rapport à la forme crénelée (Beaumont *et al.*, 2000; Pottier *et al.*, 2015).

6.3 Le réglage de la tension sur les appareils de pêche à l'électricité

6.3.1 Conductivités de 100 à 1 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$

À basse conductivité, la tension appliquée dans l'eau V_a doit être augmentée. Inversement avec de fortes conductivités V_a doit être baissée. D'après des expériences menées dans des zones à truites, Cuinat (1968) considère que V_a doit augmenter de 100 V à chaque fois que la conductivité diminue de moitié dans des conductivités se situant entre 31,25 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et 500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, en partant avec comme référence une tension de 300 V DC à 500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

En cas de très fortes conductivités, il est possible de réduire la tension appliquée dans l'eau tout en gardant une efficacité de capture satisfaisante en diminuant le diamètre de l'anode. Inversement, la baisse de la tension à l'anode peut être obtenue en diminuant la surface de la cathode dans l'eau. Cela augmente sa résistance équivalente ce qui provoque une diminution de la tension à l'anode.

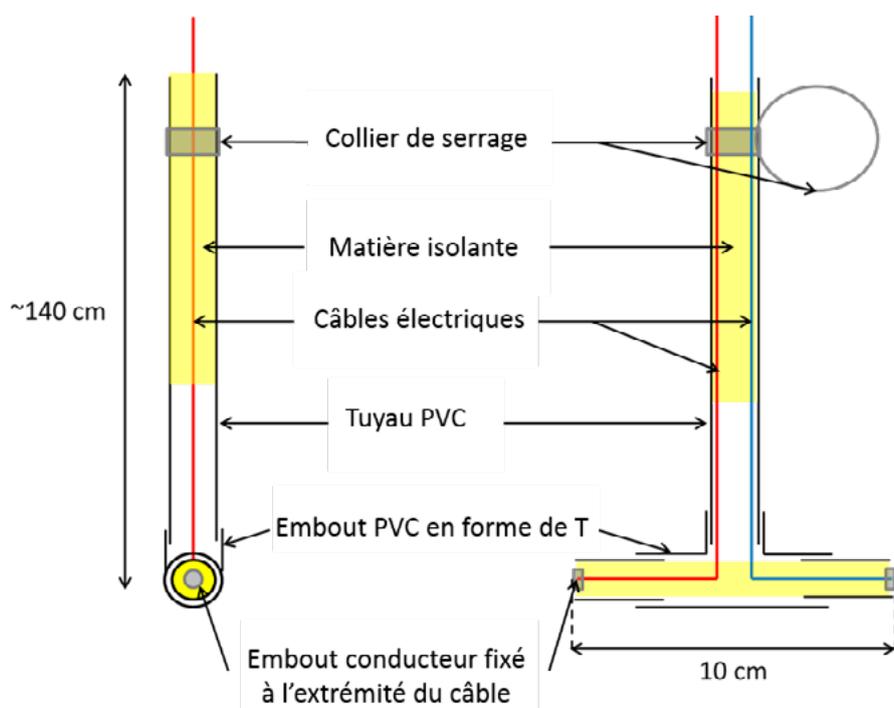
Beaumont (2016) propose des plages de tension à régler sur un engin de pêche à l'électricité en fonction de différentes plages de conductivité (Tableau 7). Ces réglages sont proposés pour une configuration avec une anode de 30-40 cm et une cathode de 300 cm alimentées par un générateur AC de 3,5 kVA. Dans ce cas, la puissance nécessaire est trop élevée pour de fortes conductivités du fait de la trop faible puissance du générateur. Il existe tout de même des engins de pêche avec des générateurs dotés d'une puissance de sortie pouvant atteindre 10 kVA.

Tableau 7. Suggestions de tensions à régler pour différentes conductivités pour une configuration comportant une anode de 30-40 cm de diamètre, une cathode de 300 cm de long et un générateur AC d'une puissance maximale de 3,5 kVA
N.B. Lors de l'utilisation de PDC, la fréquence et le rapport cyclique vont affecter la tension nécessaire. Source : Beaumont (2016).

Conductivité de l'eau ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Tension recommandée (V)	
	DC	PDC
< 50	> 700 (1 000 max autorisé)	>500 (1 000 max autorisé)
50-150	400-500	300-400
150-500	300-400	150-250
500-800	Puissance nécessaire trop élevée	150-200
800-1 000	Puissance nécessaire trop élevée	120-180
> 1 000	Puissance nécessaire trop élevée	50-150

6.3.2 Ajuster la tension en fonction du champ d'attraction voulu

Pour combiner l'efficacité de capture et le bien-être des poissons, il est recommandé de mesurer la distance de gradient de tension de $0,1 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ à l'aide d'une sonde Penny (Partie 1.2.3) afin de régler la tension selon la situation. Dans le cas où cela n'est pas possible, les équations dans le Tableau 2 pages 36-37 permettent de calculer le réglage de la tension sur l'engin de pêche à l'électricité en fonction de sa configuration et des conditions relatives au milieu. Un classeur Excel® nommé Carpe (Conseil et accompagnement pour les réglages de pêche électrique) est téléchargeable gratuitement aux adresses e-mail suivantes : frederic.marchand@inrae.fr et ga.pottier@gmail.com.



Matériel nécessaire

Un multimètre capable de mesurer la tension DC et le pic de tension lors de l'utilisation du PDC (fonction MIN/MAX) est nécessaire.

Les sondes Penny ne sont pas commercialisées mais le plan de la Figure 57 et la fiche technique de fabrication en annexe (Annexe 3) permettent d'en construire. Un décimètre est nécessaire pour mesurer la distance du rayon d'attraction.

Figure 57. Plan de construction d'une sonde Penny.

Mesurer le champ d'attraction

Le même protocole est utilisable pour DC et le PDC. Dans un premier temps, il faut s'assurer que les bornes positive et négative de la sonde Penny soient bien connectées au voltmètre. L'exemple ci-dessous est pris à l'aide d'un voltmètre FLUKE 113, il reste similaire si vous utilisez des modèles équivalents d'autres marques.

Pour mesurer la tension DC au voltmètre :

- positionner le bouton de réglage du voltmètre à Volt DC \overline{V} . Ce réglage permet de mesurer la tension pour le DC.

Pour mesurer le pic de tension PDC avec le voltmètre :

- positionner le bouton de réglage du voltmètre à Volt DC \overline{V} . Cela permet de mesurer la tension pour le PDC;
- presser une fois le bouton **MIN MAX** pour afficher les mots « MIN MAX »;
- presser une seconde fois le bouton **MIN MAX** pour afficher le mot « MAX » après le « MIN MAX »;
- presser une fois le bouton **PEAK** pour afficher le mot « PEAK » après « MIN MAX » et « MAX ». Vous êtes désormais prêt à mesurer le pic de tension.

Utiliser la sonde Penny :

- plonger la sonde Penny dans l'eau et l'orienter en face de l'anode de sorte qu'elle mesure le maximum de gradient de tension (Figure 58);
- la sonde doit être positionnée dans le bon sens, s'assurer qu'elle ne mesure pas le gradient de tension à l'envers. Dans le cas du DC elle est à l'endroit lorsque la valeur est positive, et à l'envers lorsqu'elle est négative. Pour le courant pulsé, la sonde est à l'endroit lorsque la valeur observée sur le voltmètre n'est ni proche de zéro ni négative;
- l'extrémité du décimètre doit être tenue de manière fixe afin de mesurer la distance entre la sonde et l'anode (Figure 59);
- la tension est appliquée. La position initiale mesurée correspond à la valeur au bord de l'anode;
- la valeur de tension de 1 V est recherchée en éloignant la sonde Penny de l'anode. Elle correspond à un gradient de 1 V pour 10 cm soit $0,1 \text{ V.cm}^{-1}$ qui caractérise le rayon d'attraction théorique pour la plage de conductivité de 100 à 10 000 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (Cuinat, 1968; Lamarque, 1968; Kolz et Reynolds, 1989; Meismer, 1999; Snyder, 2003a). Dans des cours d'eau de très faible conductivité, des gradients de tension plus importants sont recherchés;
- le rayon du champ d'attraction, à partir du bord de l'anode correspond à la soustraction de la distance de la sonde à celle du bord de l'anode.

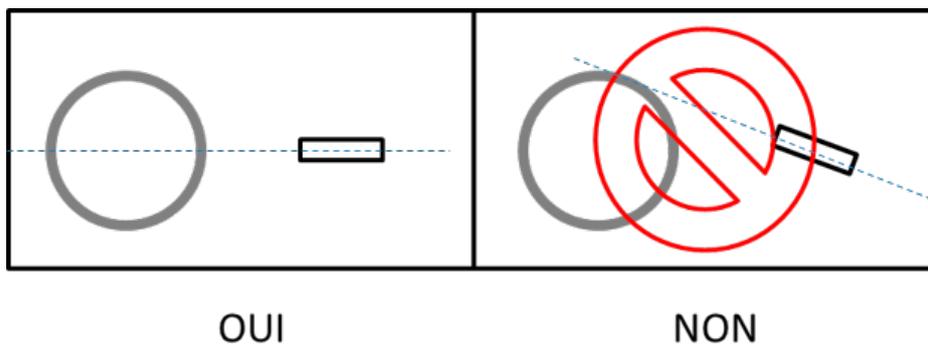


Figure 58. Orientation correcte de la sonde Penny face à l'anode.

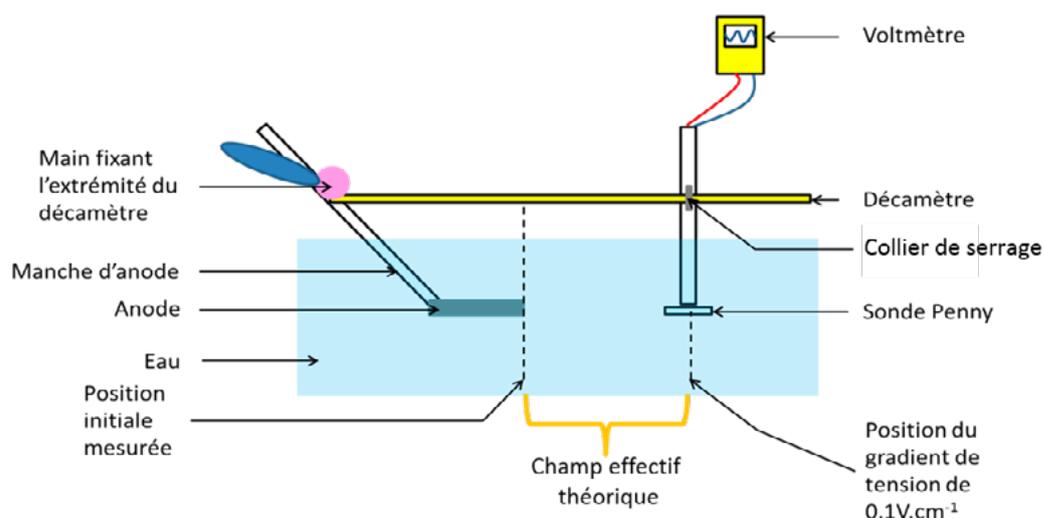


Figure 59. Protocole de mesure du gradient de tension dans l'eau.

6.3.3 Lors de très faibles conductivités ($\leq 50 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)

L'efficacité de capture devient très faible dans des conditions de conductivités très basses. D'après Allard *et al.* (2014), l'efficacité de capture était estimée à moins de 10 % avec une conductivité inférieure à $25 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Pour pallier à ces faibles conductivités de $32\text{-}42 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, Penczak *et al.* (2003, 1997) proposent d'ajouter du sel dans l'eau à l'aide de sacs troués immergés dans le cours d'eau afin d'augmenter la conductivité à $150\text{-}200 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ de façon localisée.

Le fait de pêcher dans des conductivités différentes induit un changement de la valeur du rapport d'inadéquation noté q (Équation 24, partie 3.4) qui explique la proportion de puissance appliquée (P_a) au poisson provenant de la puissance totale (P_t) du champ électrique qui pénètre dans le corps du poisson (Kolz, 1989).

Dans ce cas, une approche plus laborieuse que les modèles de prédilection peut être utilisée. Le but est de retrouver la même valeur de P_a avec une faible conductivité sachant sa valeur avec une conductivité qui a déjà été prospectée. Il faut les données de conditions de pêches où l'efficacité était bonne ($\geq 80\%$) :

- la tension réglée (U_1) en V;
- la résistance équivalente totale du circuit (Re_{qtot_1}) en Ω ;
- la conductivité ambiante de l'eau (C_{w_1}) en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;
- la conductivité efficace de l'espèce de poisson (C_f) en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, si vous ne l'avez pas, elle prend la valeur de $115 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Miranda, 2009).

Il faut calculer la puissance totale fournie (P_{tot_1} en W) à l'aide de l'Équation 18 :

$$P_{tot_1} = \frac{(U_1)^2}{Re_{qtot_1}}$$

Puis calculer le rapport d'inadéquation q_1 (Équation 27).

$$q_1 = \frac{C_f}{C_{w_1}} \quad \text{Équation 27}$$

Grâce à q_1 , le rapport de puissance MCP_1 (Kolz, 1989) est déduit (Équation 28).

$$MCP_1 = \frac{4q_1}{(1+q_1)^2} \quad \text{Équation 28}$$

La valeur de la puissance appliquée sur le poisson P_a pour cette conductivité peut alors être obtenue à l'aide de l'Équation 29.

$$P_a = P_{tot_1} \times MCP_1 \quad \text{Équation 29}$$

Les valeurs des variables obtenues permettent de connaître les conditions idéales de pêche. Il faut effectuer le raisonnement inverse pour une faible conductivité Cw_2 .

Calculer le nouveau rapport d'inadéquation q_2 :

$$q_2 = \frac{Cf}{Cw_2}$$

Le nouveau rapport de puissance MCP_2 est déduit:

$$MCP_2 = \frac{4q_2}{(1 + q_2)^2}$$

La puissance totale fournie (P_{tot_2}) est calculée:

$$P_{tot_2} = P_a \times MCP_2$$

La résistance équivalente ($Reqtot_2$) du système électrique doit être recalculée:

$$Reqtot_2 = Reqtot_1 \times \frac{Cw_1}{Cw_2}$$

La tension à régler U_2 pour une conductivité Cw_2 est donc:

$$U_2 = \sqrt{P_{tot_2} \times Reqtot_2}$$

Cela revient à augmenter la tension à un niveau relativement haut. Lamarque (1990a) décrit des pêches avec beaucoup de difficultés à capturer des poissons effectuées dans le bassin amazonien avec une conductivité entre 10 et 20 $\mu S.cm^{-1}$. Les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant de grandes électrodes (diamètre d'anode > 60 cm et section transversale > 2 cm) et de forts pics de tension (800-1650 V) avec du courant pulsé de la forme d'un quart de sinusoïde.

Dans le cas où la puissance P_{tot_2} demandée est trop importante pour une tension U_2 requise, il est possible d'utiliser le PDC (avec un rapport cyclique entre 10 % et 50 %). De ce fait, la puissance nécessaire sera égale à:

$$P_{tot_2} \times \% \text{ rapport cyclique.}$$

6.4 Réglage de la fréquence en cas d'utilisation du PDC

Lorsque la fréquence augmente au-delà de 15 Hz, les niveaux de blessures augmentent. (Cooke *et al.*, 1998; Sharber *et al.*, 1994; Snyder, 2003b). Cependant, en fonction des espèces ciblées, la distance d'immobilisation n'augmente pas toujours lorsque la fréquence accroît (Davidson 1984 dans Beaumont, 2011). Pour causer un minimum de dommages et avoir un maximum d'efficacité, il faut cibler une fréquence se situant entre 20 et 40 Hz (Beaumont, 2011).

Suite à des observations qualitatives, Novotny et Priegel (1974) ont suggéré une sélectivité des espèces pêchées selon la fréquence utilisée. Les truites, les carpes, les chabots et les black-bass répondent bien aux fortes fréquences et s'approchent plutôt bien de l'anode avant d'être tétanisés. Les *Sander vitreus*, *Perca flavescens*, *Morone chrysops*, et les *Morone* sp sont plus facilement tétanisés à de plus faibles fréquences, requises pour les attirer au plus proche de l'anode. Le Tableau 8 résume les fréquences qui sont optimales pour capturer efficacement différents taxons tout en respectant leur intégrité physique.

Tableau 8. Fréquences optimales pour un compromis entre l'attraction, l'immobilisation et le bien-être des poissons

Taxons	Fréquence optimale (Hz)	Références
Anguille	10-40	EIFAC (2005)
	20	Halsband (1968)
Brochet	30-50	EIFAC (2005)
Carpe	50	Halsband (1968)
Truite	80	Halsband (1968)
Vairon	90	Halsband (1968)
Cyprinidés	30-50	EIFAC (2005)
Percidés	10-40	EIFAC (2005)
Salmonidés	40-60	EIFAC (2005)

6.5 Réglage du rapport cyclique en cas d'utilisation du PDC

Le rapport cyclique permet de diminuer la puissance nécessaire. Cependant l'incidence des blessures spinales et de la mortalité est corrélée négativement au rapport cyclique (Dolan et Miranda, 2004; Snyder, 2003a). Hors de l'intervalle 10-50 %, le rapport cyclique peut induire une baisse d'efficacité de capture (Miranda et Dolan, 2004). Il convient donc de régler la valeur du rapport cyclique autour de 25 % afin d'avoir un compromis entre la limite de consommation de puissance et l'impact sur la santé des poissons.

La commission européenne consultative pour les pêches dans les eaux intérieures (EIFAC, 2005) préconise des réglages du rapport cyclique en fonction de la conductivité de l'eau de la station prospectée (Tableau 9). Elle préconise de systématiquement régler le rapport cyclique au minimum au début et d'augmenter la valeur si nécessaire sans dépasser la valeur de 50 %.

Tableau 9. Plages de rapport cyclique à régler en fonction de la plage de conductivité ambiante de l'eau - D'après EIFAC, 2005.

Conductivité ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Rapport cyclique (%)
< 150	10
150 - 500	10-20
500 - 800	10-30
800 – 1 000	
10-40	
> 1 000	10-50

7 Moyens de prospection



7.1 Pêche à pied en cours d'eau peu profonds

La pêche à l'électricité à pied se pratique dans les cours d'eau peu profonds. La limite de profondeur maximale, de l'ordre de 70 cm est surtout conditionnée par la taille de l'opérateur. Le(s) porteur(s) d'anode(s) se positionne(nt) devant ou au même niveau que les porteurs d'épuisette. Les porteurs de seau et le tireur du câble de l'anode restent derrière l'équipe de pêche pour ne pas gêner les personnes chargées de capturer les poissons (Figure 60). La prospection s'opère de l'aval vers l'amont. Lorsqu'un poisson est électro-choqué, la vitesse du courant le dirige vers l'épuisette. Un autre avantage de ce sens de progression est d'éviter de troubler l'eau et de diminuer ainsi la visibilité dans les zones qui ne sont pas encore prospectées. Les opérations de pêche à objectif « peuplement plurispécifique » préconisés par la directive cadre européenne sont largement décrites dans le Guide de pratique de mise en œuvre des opérations de pêche à l'électricité (Belliard *et al.*, 2012) et plusieurs normes européennes et françaises : NF EN 14011, NF EN 14962, XP T90 383 (Afnor, 2003, 2006a, 2008).



Figure 60. Exemple d'une opération de pêche avec un engin de pêche à l'électricité portable accompagné de deux épuisettes et d'un seau.

7.2 Pêches sur des zones profondes

7.2.1 En bateau

Lorsque le cours d'eau est trop profond (>70 cm), la pêche à pied devient difficile et dangereuse. Il n'est donc plus possible de réaliser une pêche complète. Il est préconisé de réaliser une pêche partielle (Belliard *et al.*, 2012; Tomanova *et al.*, 2013). L'utilisation d'une embarcation constitue une alternative (Figure 61). Le matériel classique de pêche à l'électricité peut être utilisé en condition embarquée. L'utilisation d'un moteur permet la progression et le positionnement du bateau. Ce dernier doit être dirigé avec précision pour s'approcher et se stabiliser sur les points de pêche en évitant de faire fuir les poissons.



Figure 61. Pêche à l'électricité en bateau. L'engin de pêche est embarqué sur le bateau.

7.2.2 Utilisation d'un Boom-boat

Dans le cas de suivi en grands cours d'eau ou en plans d'eau, l'utilisation du *boom-boat* peut être envisagée (Figure 62). Ce type de bateau possède un générateur à bord qui produit du courant électrique. Les anodes sont suspendues par des perches (*boom* en anglais) fixées à l'avant du bateau, où un ou plusieurs opérateurs se concentrent à la capture des poissons (Cowx *et al.*, 1988; Novotny et Priegel, 1974). Les anodes sont habituellement constituées d'une rangée de tubes en métal suspendue à un anneau. Des sphères métalliques sont parfois utilisées. Les cathodes doivent être de taille suffisante pour optimiser le champ d'attraction fourni par l'anode. Les cathodes ne doivent pas être positionnées trop proches des anodes ni de l'hélice du bateau. Certains modèles de bateaux métalliques utilisent leur coque comme cathode ce qui permet d'avoir une grande surface de contact avec l'eau.



© UFBAG

L'utilisation d'un *boom-boat* est largement répandue aux États-Unis (Novotny et Priegel, 1974) alors qu'en France seuls quelques exemplaires sont en service.

Ce moyen d'échantillonnage ne permet pas d'estimer des abondances totales car les individus benthiques sont rarement capturés. Cependant il s'avère aussi efficace que les méthodes conventionnelles (filets maillants, seines, échantillonnages ponctuels d'abondance) pour estimer la richesse spécifique, fournir une estimation quantitative et/ou qualitative de l'abondance relative, et il ne tue pas les poissons (Cucherousset *et al.*, 2014).

Figure 62 : Boom-boat avec deux anodes suspendues à l'avant du bateau.



8 Bien-être animal

8.1 Réduire le stress

Le simple fait de manipuler le poisson peut induire une forme de stress en réponse. Le poisson peut mettre des jours et même des semaines pour récupérer (Pickering *et al.*, 1982). Plusieurs formes de stress peuvent résulter de la pêche à l'électricité, de la manipulation, du maintien ou du transport des poissons (voir partie 4.1.7). Le Tableau 10 propose des mesures qui peuvent être prises pour réduire le stress lors durant ces phases opératoires.

Tableau 10. Mesures qui peuvent être adoptées pour réduire le stress durant le maintien, la manipulation et le transport de poissons
Sources : Pickering (1993 dans Ross et Ross, 2008) et Ross et Ross (2008)

Raisons	Actions suggérées	Application	Informations
La réponse est habituellement proportionnelle à la durée d'exposition au stress	Réduire la durée d'exposition du stress	Générale	Quelques effets peuvent se traduire par de longs délais de récupération
La mortalité due au stress augmente avec la température	Travailler à de plus basses températures	Générale	Pas toujours applicable sur le terrain
Les stressors peuvent être additifs ou synergiques	Prévenir plusieurs stress simultanés	Générale	Possibilité de laisser du temps entre les expositions des différents stressors, s'il s'agit d'une séquence
Réduire les besoins en oxygène et la pollution	Retirer la nourriture : 2-3 jours en eau froide et 12-24 heures en eau tropicale. Installer des oxygénateurs	Générale, manipulation, transport	Nécessite une gestion supplémentaire
Réduire les interactions et l'abrasion	Réduire la densité de stockage ou le nombre manipulé par lot	Générale, manipulation, transport	Peut avoir des conflits entre l'intensification de l'aquaculture
Apporter un confort environnemental	Apporter un environnement adéquat, plus naturel	Général	Pas toujours possible dans certains systèmes de culture
Faciliter la manipulation, réduire temporairement la consommation d'oxygène, réduire les sorties de dioxyde de carbone et d'ammoniac	Utiliser une anesthésie légère ou une sédation	Manipulation, transport	Les anesthésiants peuvent agir comme des stressors

8.2 Manipulation des poissons

La manipulation des poissons dans leur environnement naturel ou non induit une certaine difficulté. La lutte de ces individus lors de la capture et de la manipulation a un effet sur leur comportement et leur physiologie. Par conséquent il est quasiment toujours nécessaire d'immobiliser les poissons avant de tenter de réaliser une tâche même simple.

Le fait d'anesthésier les poissons permet donc aux opérateurs de réduire le stress lié à la manipulation et les dommages physiques (notamment sur les écailles et la peau) dus aux mouvements des poissons (Ross et Ross, 2008). Il faut tout de même noter que les procédures d'anesthésie peuvent avoir des effets secondaires plutôt indésirables, comme une mobilité réduite du sperme (Allison, 1960). Mais généralement, les avantages d'une anesthésie dépassent leur désavantage si une technique correcte et un contrôle suffisant sont appliqués. L'anesthésie doit être mise en place pour les individus les plus difficiles à manipuler (forte mobilité).

8.3 Contention des poissons

Lorsque les poissons capturés sont placés dans des bacs de rétention, l'utilisation de la végétation et d'autres types d'abris peut réduire leur stress. Idéalement, un grand volume d'eau doit être alloué pour chaque poisson. Lorsque la densité des poissons augmente rapidement, l'aération de l'eau devient critique et les produits issus de l'excrétion peuvent atteindre des niveaux toxiques. En forte densité, les contacts fréquents entre les individus accroissent leur activité, ce qui augmente la consommation en oxygène, le risque de dommages et une perte de mucus. De grandes quantités de perte de mucus dans l'eau peuvent boucher les branchies et conduire à un inconfort considérable des poissons (Taylor et Solomon, 1979). Ce phénomène est particulièrement important pour le mucus de l'anguille. Aussi, lorsque les anguilles sont abondantes, il est préférable de les stocker à part et dans un récipient humide sans eau.

8.4 Oxygène et dioxyde de carbone

L'augmentation de la consommation en oxygène est un des effets immédiats causés par le stress. Le maintien d'un niveau adéquat d'oxygène dissout est essentiel pour la survie des poissons. Idéalement, l'oxygène dissout devrait être maintenu proche de 100 % de saturation lors du transport ou du stockage (Harmon, 2009). Pour déterminer la perte d'oxygène dans

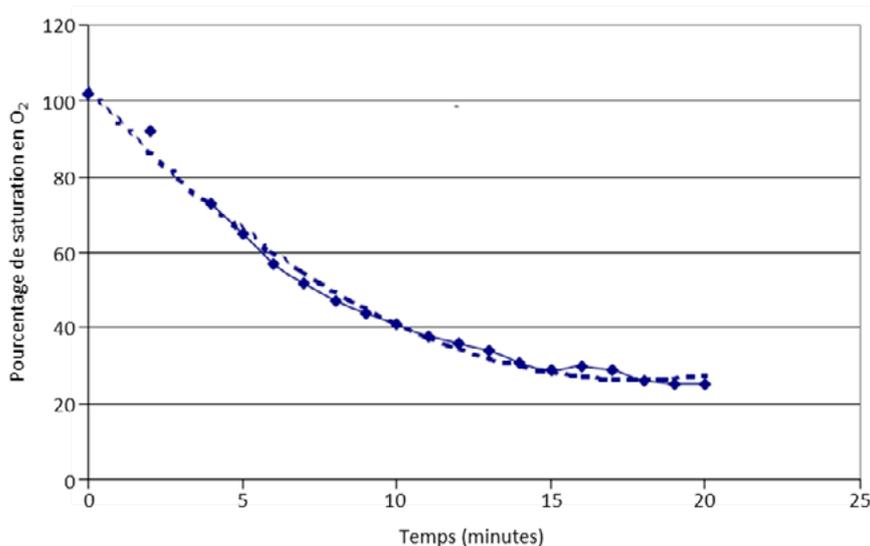


Figure 63. Épuisement de l'oxygène dissout dans une bassine après ajout de poissons. D'après Beaumont et al., 2002.

de l'eau non aérée, Beaumont et al. (2002) ont mesuré la saturation en oxygène dans une bassine contenant des truites arc-en-ciel. Cette bassine a été remplie à moitié avec 45 litres d'eau et la saturation en oxygène a été mesurée. Sur une période de 2 minutes, approximativement 20 kg de poissons (56 poissons d'un poids moyen de 357 g) ont été ajoutés dans la bassine. La température de l'eau était à 14°C. La Figure 63 montre la vitesse avec laquelle le niveau de d'oxygène dissout chute.

Les bourriches sont particulièrement efficaces pour garder les poissons dans un meilleur environnement. Il s'agit d'une espèce de panier en filet, que l'opérateur met dans l'eau et dans lequel il conserve vivants les poissons capturés. Les bassines percées et contenant un grillage fin pour éviter la fuite des poissons peuvent être une bonne alternative. Elles doivent cependant être placées dans une partie peu profonde du cours d'eau.

L'aération à l'aide de diffuseur de bulles les plus fines possibles permet d'oxygéner l'eau en ajoutant de l'O₂ atmosphérique.

8.5 Température

Lors du transport et de la maintenance des poissons, la température est un facteur très important à surveiller. Les températures létales des poissons sont spécifiques aux espèces et varient avec leur degrés d'acclimatation (Brett, 1944; Morrow et Fischenich, 2000; Hasnain *et al.*, 2010). En général, les salmonidés ont un préférendum thermique moins élevé que les autres familles de poisson d'eau douce. Scruton et Gibson (1995) recommandent également de ne pas pratiquer de pêche à l'électricité sur les salmonidés lorsque la température de l'eau atteint 18°C ou au-delà car des mortalités apparaissent à ce seuil.

8.6 Désinfection

À la fin d'une pêche sur un site, il est important de ne pas véhiculer des agents pathogènes (bactéries, champignons, virus, parasites) potentiellement présents vers un autre site. Pour cela il est recommandé de nettoyer les épuisettes, les waders et le matériel de pêche à l'électricité avant et après chaque utilisation (Munsch, 2012). En principe le matériel doit être immergé dans une solution désinfectante puis séché à l'aide d'un tissu souple. Pour des raisons pratiques, il est plus simple d'utiliser un vaporisateur qui contient la solution désinfectante pour asperger l'ensemble du matériel.

Actuellement, il n'existe pas de règle proprement définie qui préconise la désinfection du matériel mais une obligation peut figurer sur les autorisations de captures préfectorales.

Les dangers sanitaires de première catégorie sont définis par l'arrêté du 29 juillet 2013 (extrait de Direction générale de l'alimentation, 2015):

- la nécrose hématopoïétique infectieuse (NHI) et la septicémie hémorragique virale (SHV): ces deux maladies NHI et SHV sont des rhabdoviroses présentes en France essentiellement chez les salmonidés, elles ne s'expriment qu'à des températures d'eau inférieures à 14°C;
- l'herpès virose de la Carpe (HVC): cette maladie, présente en France, affecte préférentiellement les carpes. S'agissant d'un herpès virus, les symptômes ne s'expriment qu'à une température d'eau supérieure à 18°C. Le déplacement des trophées de pêche d'un plan d'eau à l'autre constitue un risque de dissémination du virus;
- l'anémie infectieuse du saumon (AIS): la France est indemne d'AIS, mais la maladie est présente en Europe, notamment en Norvège. La maladie affecte le saumon, mais également les truites arc-en-ciel et fario. Le danger de catégorie 1 est le génotype délété dans la région hautement polymorphe (RHP) du virus du genre Isavirus (ISAV) qui est responsable de la forme symptomatique de la maladie.
- la nécrose hématopoïétique épizootique (NHE): la France est indemne de NHE qui est une maladie qualifiée d'exotique par la directive 2006/88/CE car elle n'a pas été observée jusqu'à présent sur le territoire de l'Union européenne.
- l'aphomycose couramment nommée « peste des écrevisses » est une maladie foudroyante des écrevisses à pieds blancs ou à pieds rouges véhiculée par un champignon du genre *Aphanomyces astaci* transmis par les écrevisses américaines. Cette mycose peut décimer une population d'écrevisses en quelques semaines.

9 Sécurité, réglementation

9.1 Différents cas d'accidents

Les accidents peuvent surgir à tout moment lors d'une opération de pêche à l'électricité. Pour prévenir du danger, il est important de prendre conscience des différents risques possibles et de les évaluer :

- l'électrisation suite à une chute dans l'eau : l'effet dépend du gradient de tension qui traverse le corps. Le risque est important à proximité des électrodes ;
- les contacts directs avec une électrode :
 - o une main sur l'anode hors de l'eau et l'autre main dans l'eau,
 - o une main sur la virole de l'épuisette qui est en contact avec l'anode et le coude étant dans l'eau (notamment dans des cours d'eau profonds),
 - o une main en contact avec un fil dénudé, une prise de contact défectueuse ou un enrouleur défectueux, avec un genou à terre ;
- les contacts indirects avec une électrode :
 - o genou au sol et un appareil défectueux,
 - o une main nue sur un outil conducteur et l'autre avec le matériel en défaut ;
- les chutes, les obstacles et les trous : le risque ne provient pas uniquement de l'électricité. Les obstacles ou des trous peuvent être un risque de chute ou de blocage des pieds. Les conséquences peuvent être des plaies, des entorses ou des fractures ;
- en bateau, la noyade : si la noyade est possible même lors d'une prospection à pieds, c'est un risque majeur lors des opérations embarquées ;
- la faune : lors des prospections, des animaux dérangés peuvent devenir dangereux. Une grande attention doit être portée aux nids d'insectes (abeilles, guêpes et frelons) ;
- la flore : certaines plantes peuvent être piquantes ou urticantes.

9.2 Équipement de protection

Dans la liste des matériels qui suivent, certains sont obligatoires liés au risque électrique ou de noyade ou conseillés.

Du fait des risques inhérents à l'utilisation d'un courant électrique dans l'eau, les opérateurs doivent porter des équipements de protection individuelle (EPI) et des équipements de travail adaptés :

- des gants de protection électrique isolants (EPI : 1 000 V minimum) pour toutes les personnes dans l'eau et notamment celles qui participent à la capture des poissons ou à la manipulation de l'appareillage électrique, hors de l'eau, toutes les personnes qui participent à la manipulation de l'appareillage électrique notamment l'agent à la télécommande ;
- un pantalon étanche : bottes, cuissardes, ou pantalons de pêche isolants pour la tension mise en jeu (tous les équipements de travail dits respirants comme les waders en « goretex » ne doivent pas être utilisés). Le fait de ressentir des picotements est le signe certain d'un équipement qui n'isole pas, c'est parfois aussi le cas d'un équipement endommagé.

Pour les autres risques :

- des gilets de sauvetage (EPI) pour le personnel embarqué lors de pêche en bateau ;
- des vêtements couvrants (manches longues) contre les griffures, le soleil... ;
- des lunettes à verres polarisants pour sécuriser la progression dans l'eau.

9.3 Matériel conforme et adapté

Les caractéristiques techniques des engins de pêche à l'électricité doivent être conformes aux prescriptions techniques fixées par :

- le décret n°88-1056 du 14 novembre 1988 pris pour l'exécution des dispositions du livre II du code du travail (titre III: Hygiène, sécurité et conditions du travail) en ce qui concerne la protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques;
- l'arrêté du 2 février 1989 portant dérogation aux prescriptions des articles 11 et 16 du décret du 14 novembre 1988 pour l'utilisation des installations de pêche à l'électricité;
- le nouveau code du travail, plus particulièrement la quatrième partie « santé et sécurité au travail » - Livre III « équipement de travail et moyens de protection » partie législative et réglementaire;
- le décret n°95-1081 du 3 octobre 1995 relatif à la sécurité des personnes, des animaux et des biens lors de l'emploi des matériels électriques destinés à être employés dans certaines limites de tension, en référence aux normes NF EN 60204⁻¹ (Afnor, 2006b) et NF EN 60439⁻¹ (Afnor, 2000), modifié par le décret n°2003-935 du 25 septembre 2003;
- le décret n°2006-1278 du 18 octobre 2006 relatif à la compatibilité électromagnétique des équipements électriques et électroniques, en référence aux normes NF EN 50081⁻¹ (Afnor, 1992) et NF EN 50082⁻¹ (Afnor, 1998);
- les dispositions des normes Cenelec et CEI en vigueur, notamment la norme CEI 60335⁻²⁻⁸⁶ (Afnor, 2012), conformément à la norme NF EN 14011 (Afnor, 2003).

Le matériel de pêche doit également être maintenu en parfait état de marche et vérifié annuellement par un organisme agréé. En cas de changement de matériel, les nouveaux engins doivent être étalonnés par rapport aux anciens.

9.4 Adopter le bon comportement

Pour qu'une opération de pêche à l'électricité se déroule en toute sécurité, les opérateurs doivent suivre les consignes non exhaustives de la liste ci-après :

- c'est le porteur de l'anode qui décide de la position des épuisettes;
- le coup d'électrode est donné après que les épuisettes sont bien positionnées;
- le déclenchement du courant a lieu uniquement lorsque la cathode et l'anode sont dans l'eau;
- le courant doit être coupé immédiatement dès que l'anode est sortie de l'eau;
- même si un poisson s'échappe, ne jamais le ramasser directement à la main !
- éviter de pêcher en condition de pluie et ne jamais pêcher en conditions de tonnerre, d'orage ou lorsque le vent est extrêmement fort;
- pour les pêches embarquées, utiliser une embarcation stable et de très bonne flottabilité, éviter de laisser les fils déroulés dans l'embarcation (risque de chute ou de noyade si le bateau chavire);
- le chantier de pêche doit faire l'objet d'un balisage adapté, et plus particulièrement pour les installations électriques (générateur de courant, boîte de contrôle, cathode) ainsi que les véhicules empiétant sur la chaussée;
- le chantier est interdit à toutes les personnes qui ne portent pas d'équipement de protection (ne pas oublier le public sur les ponts au-dessus des cours d'eau);
- éviter absolument que des personnes non équipées de gants isolants puissent toucher aux fils, à l'anode ou à la cathode;
- toujours avoir un moyen de communication rapide opérationnel (téléphone portable) pour prévenir les secours, avoir prévu avant la pêche l'accès pour les éventuels secours;
- réaliser avant la pêche une étude de sécurité qui décrit précisément les dangers et les conduites à adopter en cas d'accident.

9.5 Autorisations administratives

Trois types d'autorisations sont nécessaires pour effectuer une prospection au moyen de la pêche à l'électricité :

- un arrêté préfectoral qui autorise la pêche scientifique à l'électricité dans la mesure où celle-ci sert à améliorer les connaissances du milieu aquatique et qu'il s'agit d'une pêche d'inventaire. Les pêches destinées à capturer des poissons pour exposition dans le cas de vulgarisation se situent dans ce cadre ;
- une autorisation du propriétaire pour le passage ou l'installation du chantier de pêche ;
- une autorisation des détenteurs du droit de pêche. Dans le domaine public comme privé, il s'agit souvent des Associations agréées de pêche et de protection du milieu aquatique (AAPPMA).

Lorsque des espèces protégées sont présentes sur le site envisagé pour la pêche, il est parfois nécessaire d'obtenir une autorisation spécifique délivrée par la Dreal.



10 Saisie des données

À la fin d'une session de pêche à l'électricité, des données compréhensibles et précises doivent être saisies. Certaines variables sont nécessaires à l'interprétation correcte des résultats et à l'amélioration des réglages des engins de pêche à l'électricité.

Les variables à saisir doivent comprendre (extrait modifié de Belliard *et al.*, 2012):

- le nom du cours d'eau, la commune, la date de prospection et la localisation du point de prélèvement, décrite par les coordonnées géographiques de sa limite aval enregistrées au GPS (en Lambert 93);
- la largeur moyenne en eau du point de prélèvement (en mètre, précision décimétrique). Elle est mesurée sur la base de relevés réguliers (au décamètre ou au télémètre pour les grandes largeurs) réalisés sur plusieurs transects (généralement 10 pour un cours d'eau entièrement prospectable à pied, à ajuster en fonction de l'hétérogénéité de la station; au moins 3 pour les cours d'eau larges, profonds et homogènes). Dans le cas des cours d'eau à bras multiples (cours d'eau en tresse notamment) cette largeur correspond à la somme des largeurs en eau de chaque bras;
- la profondeur moyenne du point de prélèvement (en mètre, précision centimétrique). Elle est mesurée sur les transects définis pour mesurer la largeur en eau à l'aide d'une perche graduée ou d'un échosondeur sur 3, 5 ou 10 points respectivement sur les petits (largeur <3 m), moyens (largeur <10 m) et grands cours d'eau. Ces points sont régulièrement répartis dans la largeur;
- la longueur prospectée (en mètre, précision métrique; mesurée au décamètre, topofil ou au télémètre);
- le mode de pêche (à pieds, mixte ou en bateau) et la stratégie d'échantillonnage (complète ou partielle par points);
- le temps de pêche par passage dans le cas d'une pêche complète ou par point dans le cas d'une pêche partielle par points;
- dans le cas d'une pêche partielle, le nombre d'unités d'échantillonnage « représentatives » et « complémentaires » dans les grands types de faciès (courant, plat, profond; en distinguant les points en berge et ceux en chenal);
- la conductivité spécifique à 25°C (en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$);
- la température de l'eau (°C);
- les conditions hydrologiques (hautes, moyennes ou basses eaux);
- la turbidité (nulle, faible ou appréciable);
- l'objectif de la pêche avec les espèces ciblées et le stade de vie.

Ces paramètres doivent faire l'objet de mesures directes, à l'exception des données attributaires des coordonnées géographiques pour lesquelles l'utilisation d'outils cartographiques est recommandée.

Des renseignements supplémentaires liés à l'engin de pêche à l'électricité sont également essentiels à l'amélioration des pratiques:

- le modèle d'engin utilisé;
- la forme de courant utilisée;
- la dimension de l'anode et de la cathode;
- le nombre d'anode(s) et de cathode(s) utilisées;
- la distance du gradient de tension de $0,1\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ à partir du bord de l'anode. Dans ce cas-là, un kit (sonde Penny + oscilloscope ou voltmètre digital) pour mesurer le gradient de tension est nécessaire et le personnel doit être entraîné à l'utiliser;
- l'occurrence des blessures et de la mort des poissons avec leur cause si possible (capture et manipulation ou électricité).

D Livrets de protocoles de pêche à l'électricité



© Michel Monsay - OFB

Indice d'abondance anguille (IAA)	85
Indice d'abondance saumon (IAS)	91
VIGITRUITE® , indice d'abondance truite (IAT)	97
Pêche toutes espèces et méthodes d'estimation des populations	103

Qu'elles soient complètes ou partielles, les pêches à l'électricité ont pour objectif d'obtenir un échantillon suffisamment représentatif des populations ou communautés présentes dans les stations prospectées. L'échantillonnage doit être reproductible dans le temps et dans l'espace pour pouvoir évaluer l'état du peuplement vis-à-vis d'un peuplement de référence (Belliard *et al.*, 2012) et permettre une analyse comparative temporelle et spatiale.

Les pêches complètes ou partielles présentent les avantages d'avoir un inventaire multispécifique, d'estimer la densité avec un intervalle de confiance et de caractériser les préférendums d'habitats des espèces. Par contre il s'agit de techniques lourdes qui nécessitent beaucoup de personnel (nombre important d'homme/jour). Elles sont également difficiles à utiliser pour connaître l'état d'une population d'une espèce à l'échelle d'un bassin versant.

C'est pour cela que des indices monospécifiques ont été élaborés (Vigitruite®, indice d'abondance saumons, indice d'abondance anguilles). Ils permettent d'établir un diagnostic des populations d'une espèce sans nécessiter beaucoup de moyens humains.

Les livrets sont des documents indépendants du livre. Pour les citer, il faut utiliser leur propre référence et non celle du livre.

Ils permettent de prendre connaissance rapidement des objectifs, de la mise en place des protocoles et des résultats qu'il est possible d'acquérir selon le protocole utilisé.

Indice d'abondance anguille (IAA)

Gaétan Pottier¹

Pierre-Marie Chapon²

1. Objet et domaine d'application

L'indice d'abondance anguille (IAA) est une méthode de pêche à l'électricité par échantillonnage par points, dérivée de la méthode d'échantillonnage ponctuel d'abondance (EPA) (Lafaille *et al.*, 2005). Cette méthode présente une bonne efficacité de capture des anguilles et elle a l'avantage de nécessiter peu de personnes et de temps pour sa mise en place. Actuellement les données obtenues sont sous forme d'indice. L'abondance des différentes classes de tailles renseigne du remplacement des générations (ou recrutement), utile au suivi démographique des populations. C'est un outil de diagnostic des populations d'anguilles et de leurs habitats en cours d'eau.

2. Choix des stations et dates de pêche

Un repérage du cours d'eau est nécessaire préalablement à la pêche. Chaque station choisie doit remplir les critères d'application du protocole (largeur < 8 m ; profondeur < 60 cm, au mieux < 40 cm) et présenter un linéaire continu de rivière sur environ 100 m. L'IAA peut être effectué à partir de juin. Toutefois, la métamorphose d'argenteure n'est visible extérieurement qu'à partir du mois d'août. Le mois de septembre est donc la période préférable.

3. Matériel requis

- Un appareil de pêche à l'électricité fournissant du courant de tension 200-350 V.
- Deux épuisettes à cadre métallique avec le bord droit de 60 cm de large et des mailles de 2 mm.
- Deux épuisettes à main de maille de 2 mm (une graduation sur le manche permet de faire des mesures de profondeur).
- Plusieurs seaux avec couvercle si possible.
- Un chronomètre.
- Un décamètre.

4. Moyens humains

La récolte des données sur le terrain nécessite une équipe de 5 à 6 personnes :

- un conducteur d'opération qui reste en rive et qui est chargé de mesurer la longueur de la station à l'aide d'un décamètre et de chronométrer la pêche. Dans certains cas, cette personne peut aussi garder les poissons dans une bassine et prendre les notes ;
- une personne chargée de prendre les notes de terrain et qui transporte le décamètre. Elle mesurera la largeur de la station avec le conducteur d'opération (1 mesure de largeur tous les 5 points, soit 6 mesures de largeurs sur les 30 points) ;
- une personne en charge de l'anode ;
- un pêcheur en aval avec une grande épuisette ;
- un autre pêcheur en aval avec une grande épuisette et une petite épuisette carrée ou ronde ;
- un porteur de seaux chargé de recueillir les anguilles et qui pourra effectuer les transferts des seaux en berge.

¹ HYDRECO, F-97388 Kourou, France

² OFB, Pôle pour la gestion des migrateurs amphihalins dans leur environnement, Direction de la recherche et de l'appui scientifique, F-35042 Rennes, France

5. Protocole

Sur la station choisie, le protocole IAA a été conçu pour que l'échantillonnage soit représentatif de la gamme des conditions d'habitat disponibles, sans *a priori* sur les préférences d'habitat de l'espèce. Cette condition est centrale pour répondre à l'objectif de standardisation, permettre la comparaison de résultats provenant de divers opérateurs et de différents cours d'eau.

L'ensemble des consignes suivantes doit être respecté. C'est la garantie de produire des données standardisées s'inscrivant dans la démarche qualité compatible avec les bases de données nationales. Dans ce sens, il est impératif à tout nouvel utilisateur de suivre une formation spécifique à la mise en œuvre de l'IAA.

Extraits de Germis (2009).

Les opérations de pêche à l'électricité se déroulent de la façon suivante.

1. L'anode n'est mise à l'eau et le courant électrique n'est ouvert que lorsque les épuisettes en aval sont en place, bien calées au sol.
2. Seules les zones inférieures à 60 cm de profondeur sont prospectées. Au-delà la probabilité de capture est trop faible. Le mieux est de fixer des zones où la profondeur est inférieure à 40 cm.
3. L'anode balaye une zone d'un mètre de diamètre en amont des épuisettes, dans la veine d'eau filtrée par celles-ci. Le champ d'attraction est évalué dans un cercle de 2 mètres de rayon qui prend en compte le champ électrique (1,5 m de rayon) et le déplacement de l'anode (0,5 m de rayon) (Figure 1).
4. Le temps de pêche pour chaque point dure 30 secondes au minimum, avec deux brèves ouvertures du circuit électrique vers les 20 secondes. L'application de l'électricité dure aussi longtemps que les anguilles continuent de sortir.
5. Les poissons attirés par l'anode descendent dans l'épuisette à la fois guidés par l'électrode et entraînés par le courant. La seconde épousette aide à la récupération du poisson électro-choqué.
6. L'échantillon se termine quand 5 secondes (après les 30 secondes minimum) se passent sans qu'une anguille ne soit capturée. Avant de terminer l'échantillonnage sur un point, un dernier coup d'épuisette comme un troubleau est effectué. Des blocs peuvent être soulevés si nécessaire.
7. Toutes les anguilles capturées sont gardées dans un seau pour être mesurées à la fin des 30 points d'échantillonnage, avec une séparation de 5 mètres entre chaque point.
8. Une fois un point fini, le porteur se déplace vers le point suivant. Il avance donc de 5 mètres dans le cours d'eau et sélectionne la position dans la largeur en fonction du plan d'échantillonnage (Figure A).
9. Trente points sont échantillonnés par station qu'il y ait des anguilles ou non.
10. La longueur de la station dépendra de sa largeur (Figure A).
11. Le conducteur de l'opération est situé sur la rive. Il assure le respect du plan d'échantillonnage et contrôle le temps à l'aide d'un chronomètre.
12. L'abondance des anguilles est quantifiée par le nombre d'individus capturés pour une unité d'effort (point d'échantillonnage).

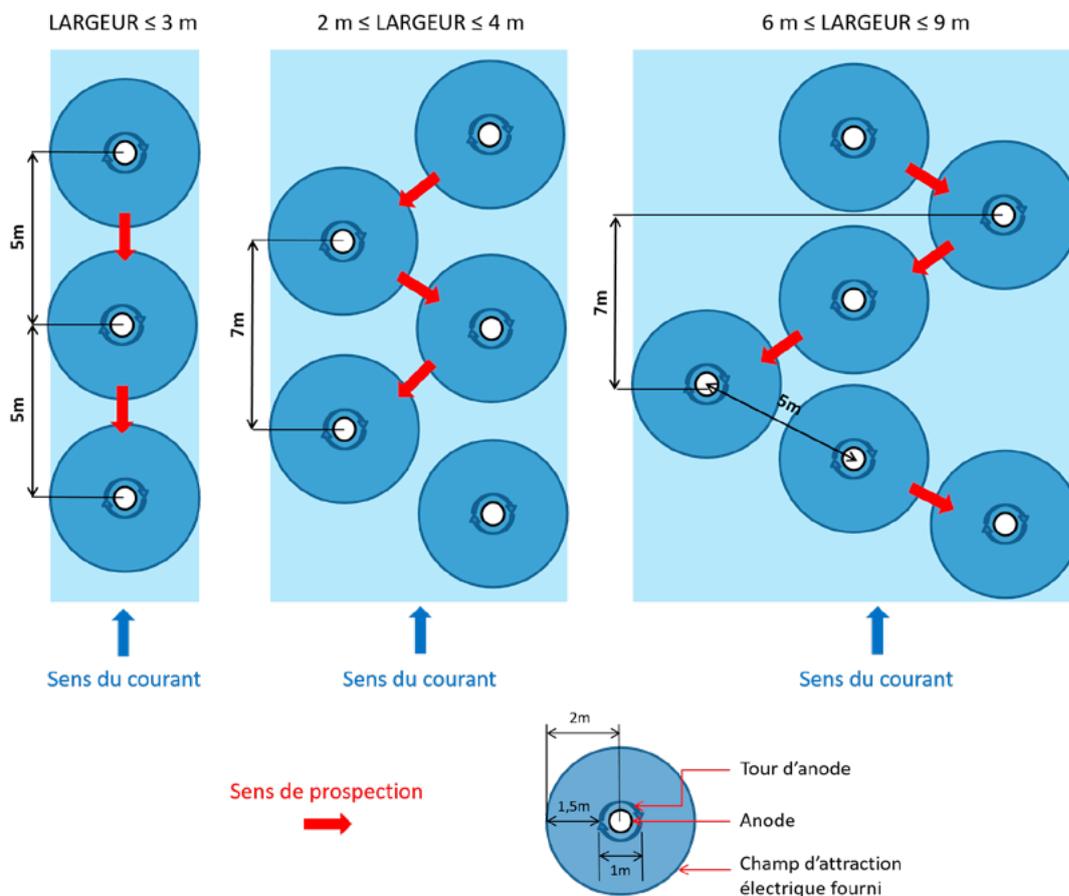


Figure A. Modalités de prospection en fonction de la largeur du cours d'eau. D'après Germis (2016).

6. Résultats obtenus

Le rapportage des résultats de l'IAA entre dans une démarche qualité, dont les critères d'évaluation portent sur le déroulement des opérations de pêche sur chaque station. Ces critères doivent être systématiquement rapportés comme suit.

1. Le temps de pêche, en minutes et secondes.
2. La longueur de la station.
3. La largeur moyenne de la station.
4. Le nombre d'anguilles pêchées en 30 points.

À l'échelle de la station

Nombre d'anguilles sur la station

Il s'agit du nombre d'anguilles capturées en 15 minutes minimum (30 points × 0,5 minutes).

Indice d'abondance anguille (IAA)

L'indice d'abondance est exprimé en captures par unité d'effort, c'est-à-dire le nombre ou la biomasse d'anguilles par point d'échantillonnage.

$$IAA = \frac{\sum_i^p n_i}{p}$$

Avec IAA exprimé en nombre d'anguilles capturées par point d'échantillonnage de 30 secondes (individus/point) ou en biomasse par point d'échantillonnage de 30 secondes (grammes/point).

Avec p le nombre de points d'échantillonnage.

Avec n le nombre d'anguilles capturées à chaque point d'échantillonnage de 30 secondes ou la biomasse mesurée par point d'échantillonnage de 30 secondes.

Estimation de la densité

Selon Germis (2016) les relations IAA-Densité ne sont pas satisfaisantes. Il n'est donc pas recommandé d'effectuer des estimations de densités jusqu'à la création d'une nouvelle relation plus fiable.

Structure en âge des populations

La taille des poissons renseigne sur leur âge approximatif, il est donc possible de réaliser une analyse sur la structure en âge de la population d'anguilles observées. Trois types de structures de populations peuvent être observés (Germis, 2009):

- population jeune: la population est dominée par les plus jeunes individus (<150 mm et 150-300 mm), qui sont les plus à même de coloniser les bassins versants;
- bon recrutement: la population est dominée par les jeunes individus (<150 mm) dans les secteurs les plus en aval et par une classe de jeunes plus âgée (150-300 mm) en amont;
- population en place: la population est centrée sur la classe 300-450 mm (individus essentiellement sédentaires) avec la présence de toutes les classes de taille;
- population relictuelle: la population est dominée par les individus les plus âgés (>450 mm), la population survit dans un endroit restreint favorable.

À l'échelle du bassin versant

Fréquence d'occurrence

La fréquence d'occurrence (en %) représente le nombre de fois où l'espèce est rencontrée rapporté au nombre total de stations. Cet indice permet de considérer les populations en fonction de leur attachement à certaines zones du bassin versant. Sur une zone, l'espèce peut être qualifiée de:

- permanente si fréquence $\geq 50\%$;
- commune si $25\% < \text{fréquence} < 50\%$;
- occasionnelle si fréquence $\leq 25\%$.

7. Le réglage de l'engin de pêche à l'électricité

La méthode IAA produit des captures par unité d'effort, dont les résultats ont été étalonnés sur les densités réelles. Lors de l'utilisation du courant pulsé crénelé, il est important de respecter une fréquence basse, de l'ordre de 20 Hz. En effet, des tests d'efficacité avec des courants continus et pulsés crénelés sur les anguilles, réalisés pour une conductivité autour de $150 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, ont montré des résultats comparables mais des blessures plus nombreuses aux fréquences de 400 Hz (Pottier *et al.*, 2017). De plus, le rapport cyclique (duty cycle) doit être réglé autour de 25 %, pour éviter la baisse d'efficacité de capture et l'augmentation des blessures sur les poissons (Dolan and Miranda, 2004; Snyder, 2003, Miranda and Dolan, 2004). L'utilisation du courant pulsé de forme exponentielle est à proscrire du fait de son faible pouvoir attractif.

Réglage de la tension: la valeur de $0,1 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ correspond au seuil théorique moyen de gradient de tension dans l'eau qui induit le phénomène de taxis sur les poissons. Le procédé le plus fiable pour s'assurer d'un rayon d'attraction suffisant est de mesurer le gradient de tension autour de l'anode, grâce à une sonde Penny (nommée par W.G. Hartley car les extrémités étaient constituées de vieilles pièces de cuivre; Figure B). Connectée à un voltmètre, la sonde est placée à 150 cm de l'anode. La tension de l'engin de pêche à l'électricité est alors ajustée jusqu'à obtenir la valeur limite de $0,1 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$. Attention, l'espace entre les 2 capteurs de la sonde étant de 10 cm, la valeur lue sur le voltmètre doit être de 1 V. Actuellement, il n'existe pas de sonde Penny en vente, elle doit être construite.

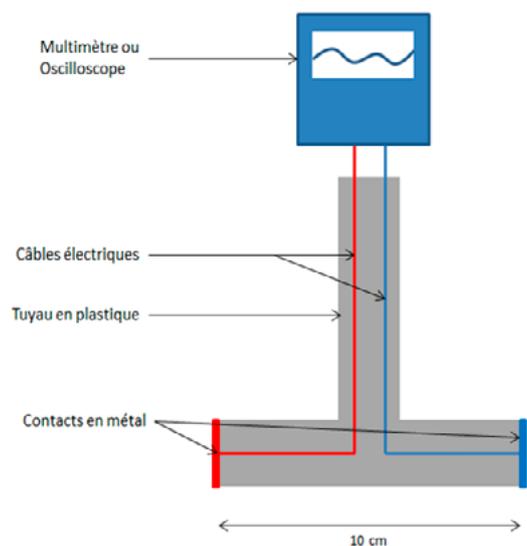


Figure B. Simple sonde Penny pour mesurer le gradient de tension.

8. Références

- Dolan, C.R., Miranda, L.E., 2004. Injury and mortality of warmwater fishes immobilized by electrofishing. *North Am. J. Fish. Manag.* 24, 118–127.
- Germis, G., 2016. Méthode de pêche électrique par échantillonnage par point au Martin-pêcheur "Indice d'Abondance Anguille". Protocole 2009 actualisé avril 2016. Bretagne Grands Migrateurs.
- Germis, G., 2009. Méthode de pêche électrique par échantillonnage par point au Martin-pêcheur « indice d'abondance anguille ». Bretagne grands migrateurs.
- Lafaille, P., Briand, C.F., Lafage, D., Lasne, E., 2005. Point sampling the abundance of European eel (*Anguilla anguilla*) in freshwater areas. *Arch. Für Hydrobiol.* 162, 91–98.
- Miranda, L.E., Dolan, C.R., 2004. Electrofishing Power Requirements in Relation to Duty Cycle. *North Am. J. Fish. Manag.* 24, 55–62. <https://doi.org/10.1577/M02-114>
- Pottier, G., Marchand, F., Azam, D., 2016. Test d'efficacité des dispositifs de pêche à l'électricité : focus sur l'anguille commune et toutes espèces. INRA, 1036 (U3E), Pôle Gest'Aqua, Rennes.
- Snyder, D.E., 2003. Electrofishing and its harmful effects on fish (Information and Technology Report USGS/BRD/ITR-2003-0002). U.S. Geological Survey Biological Resources Division. U.S. Government Printing Office, Denver, CO.

Indice d'abondance saumon (IAS)

Gaétan Pottier¹

Frédéric Marchand²

Sabrina Servant²

Etienne Prévost³

1. Objet et domaine d'application

L'objectif de cette méthode est d'estimer le niveau d'abondance de juvéniles de saumon atlantique (*Salmo salar*) sur une station. Ce protocole vise les juvéniles de l'année (d'âge 0+) dont l'abondance traduit le renouvellement des générations au sein de la population (ou recrutement) et la survie après les phases de développement embryonnaire sous gravier et les premiers mois de vie en milieu ouvert.

2. Choix des stations et dates de pêche

Un repérage du cours d'eau est nécessaire préalablement à la pêche. Les stations prospectées doivent présenter une homogénéité d'habitat et seuls les radiers/rapides (granulométrie grossière, profondeur < 40 cm et vitesse de courant > 40 cm.s⁻¹), habitat préférentiel des juvéniles saumons, sont prospectés (Prévost and Baglinière, 1993). Cette condition répond à un objectif de standardisation de la mise en œuvre de l'indice en vue de permettre la comparaison de résultats provenant de divers opérateurs, voire d'un cours d'eau à l'autre.

Les pêches sont réalisées en fin d'été, début d'automne (septembre, octobre préférentiellement).

3. Matériel requis

- Un appareil de pêche portable délivrant un courant de tension 200-350 V. Pour des raisons d'autonomie des batteries, un courant pulsé crénelé de fréquence 50 Hz, peut être utilisé. L'appareil de pêche doit être équipé d'un compteur de temps en minutes et secondes mesurant la durée d'application du champ électrique dans l'eau.
- Une épuisette raquette d'environ 25 cm de diamètre avec des mailles de 5 mm maximum.
- Une épuisette semi circulaire de 60 cm de large et 40 cm de haut avec des mailles de 5 mm maximum.
- Une épuisette semi circulaire de 75 cm de large et 50 cm de haut, avec des mailles de 5 mm maximum.
- Un seau (profondeur de 40 cm minimum et diamètre ~ 30 cm).

4. Moyens humains

La récolte des données sur le terrain nécessite une équipe de 4 personnes :

- un opérateur en charge de l'appareil de pêche à l'électricité;
- un pêcheur qui utilise la plus petite des deux épuisettes semi-circulaires et l'épuisette raquette;
- un pêcheur qui utilise la plus grande des épuisettes semi-circulaires;
- un porteur de seau qui collecte les poissons et veille à leur état de santé.

La récolte des données (longueur, poids, sexe, prélèvement de tissus...) sur les poissons capturés s'effectue par l'ensemble du personnel à la fin de la pêche.

¹ HYDRECO, F-97388 Kourou, France

² INRAE, 1036, U3E, Unité expérimentale d'écologie et d'écotoxicologie aquatique, Pôle pour la gestion des migrateurs amphihalins dans leur environnement, F-35042, Rennes, France

³ Université de Pau et des Pays de l'Adour, e2s UPPA, INRAE, ECOBIOP, Pôle pour la gestion des migrateurs amphihalins dans leur environnement, F-64310, Saint-Pée-sur-Nivelle, France

5. Protocole

Sur la station choisie, le protocole IAS a été conçu pour que l'échantillonnage soit représentatif des conditions d'habitat disponibles, correspondant aux préférences de l'espèce (c.-à-d. habitat de type radier-rapide). Cette condition de standardisation est centrale pour permettre la comparaison de résultats provenant de divers opérateurs et de différents cours d'eau.

Les opérations de pêche à l'électricité se déroulent de la façon suivante (Prévost and Baglinière, 1993).

1. Les épuisettes sont placées face au courant, appuyées sur le fond, position fixe. L'utilisation de cadre de tailles différentes permet de mieux s'adapter à la topographie locale du fond.
2. L'anode balaye une zone d'environ 4-5 m en amont des épuisettes, dans la veine d'eau filtrée par celles-ci.
3. Les poissons attirés par l'anode puis choqués descendent dans les épuisettes, à la fois guidés par l'électrode et entraînés par le courant.
4. Si besoin, les poissons bloqués sur le fond ou dans la végétation aquatique sont récupérés grâce à l'épuisette à main.
5. Les individus sont transférés dans le seau.
6. L'ensemble de l'équipe se déplace latéralement de quelques mètres (l'opérateur en charge de l'engin de pêche à l'électricité prend soin de ne pas marcher sur la zone qu'il va ensuite prospecter avec l'anode) pour sortir de la région qui vient d'être perturbée par le champ électrique, puis les étapes 1 à 5 sont répétées. Quand une des rives est atteinte, la progression se fait de quelques mètres vers l'amont. L'échantillonnage d'une station s'arrête au bout de 5 minutes de temps de pêche effectif (durant lequel le courant passe dans l'eau) mesuré directement sur le compteur de l'appareil de pêche à l'électricité.
7. L'abondance des juvéniles est quantifiée par le nombre d'individus capturés pour une unité d'effort de 5 minutes de pêche effective dans les conditions précisées ci-dessus.

L'ensemble de ces étapes doit être respecté. C'est la garantie de produire des estimations standardisées s'inscrivant dans la démarche qualité compatible avec les bases de données nationales. Dans ce sens, il est impératif pour tout nouvel utilisateur de suivre une formation spécifique à la mise en œuvre de l'IAS.

6. Résultats obtenus

Le rapportage des résultats de l'IAS entre dans une démarche qualité, dont les critères d'évaluation portent sur le déroulement des opérations de pêche sur chaque station. Ces critères doivent être systématiquement rapportés.

1. Le nombre de traits réalisés, qui doit être compris entre 35 et 45.
2. La longueur de la station.
3. La largeur moyenne de la station.
4. La surface d'équivalent radier-rapide (SRR) lorsque c'est possible.
5. La longueur à la fourche de tous les individus capturés (pour connaître leur âge).

À l'échelle de la station

L'indice d'abondance (IAS)

Il s'agit du nombre de tacons de l'année (âge 0+) capturés par 5 minutes sur une station déterminée. La distinction de la cohorte de l'année de celle de l'année antérieure se fait en général après examen d'histogrammes de distribution de la longueur à la fourche (mm) (Figure A), et éventuellement complété par de la détermination d'âge à partir d'écaillés prélevées lors de l'opération de pêche. Pour un bassin versant, cet indice d'abondance permet d'observer la force de recrutement en jeunes de l'année selon la localisation dans l'espace et dans le temps.

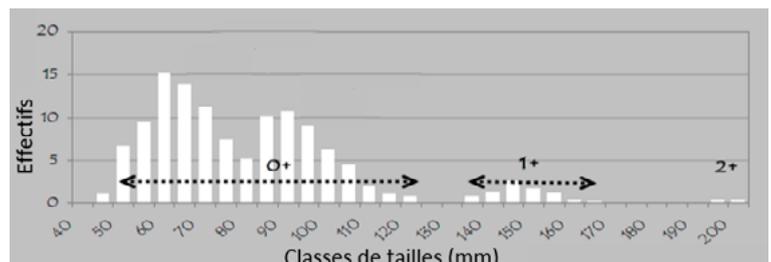


Figure A. Histogramme de la distribution théorique des tailles de tacons de saumon atlantique sur une station. Source : Goulmy (2013).

La densité de tacons 0+

À partir d'un ensemble d'opérations de pêches conduites sur des cours d'eau du Massif armoricain Prévost et Nihouarn (1999) ont montré l'existence d'une relation linéaire entre l'IAS et une estimation de la densité exprimée en nombre d'individus tacons 0+ par 100 m².

$$\text{Estimation de densité} = A \times \text{IAS}$$

Avec:

IAS le nombre de tacons 0+ capturés en 5 minutes (nombre 0+/5 min) ;

A = 0,358 ; avec un intervalle de confiance à 95 % égal à [0,286 ; 0,430] pour les cours d'eau de plus de 3 mètres de large.

Plus récemment, sur les mêmes données, des abaques (Figure B) ont été mis en place pour convertir l'IAS en densité en tenant compte de la largeur du cours d'eau (Servanty et Prévost, 2016).

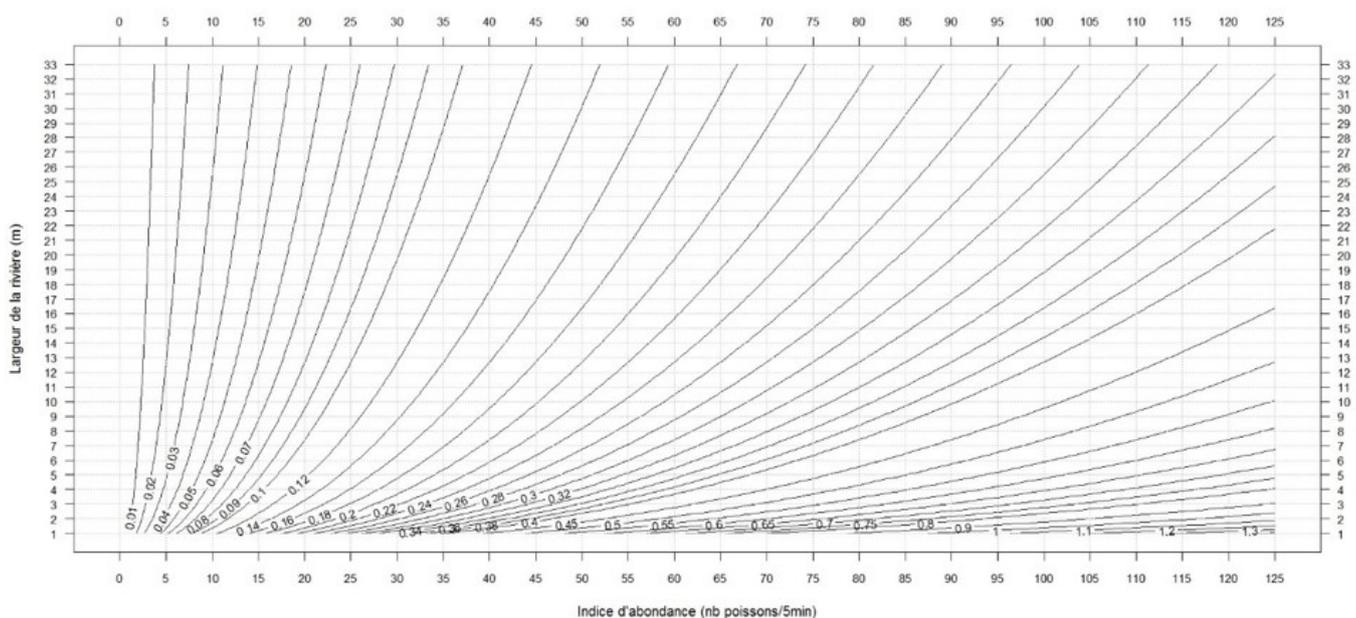


Figure B. Représentation graphique de la relation de proportionnalité entre les valeurs d'IA (nb poissons/5min de pêche) et la densité selon la largeur de la rivière au niveau de la station d'échantillonnage, établie pour le site du Scorff.

Les lignes de contour représentent la valeur médiane des indices d'abondance qui est estimée à partir de la relation de proportionnalité. Les incertitudes associées ne sont pas représentées. Source: Servanty et Prévost (2016).

Il est important de noter que l'estimation de densité pour une station et une année donnée est peu précise (Figure C). La méthode des IAS a été développée pour faciliter la mise en place de réseaux de surveillance du recrutement à l'échelle d'un ensemble de stations, si possible suivi sur une base pluriannuelle. Dans ce cadre, elle permet de représenter une distribution spatiale de la production de juvéniles de saumons et ses fluctuations temporelles. Différentes approches peuvent être employées pour valoriser les données d'IAS à l'échelle de bassin versant et sur une base de suivi pluriannuel. Servanty et Prévost (2016) fournissent des illustrations récentes de ces approches. Il existe aussi d'autres méthodes mise en œuvre à l'échelle de la Bretagne (<https://www.observatoire-poissons-migrateurs-bretagne.fr>) ou de l'Allier (www.migrateurs-loire.fr).

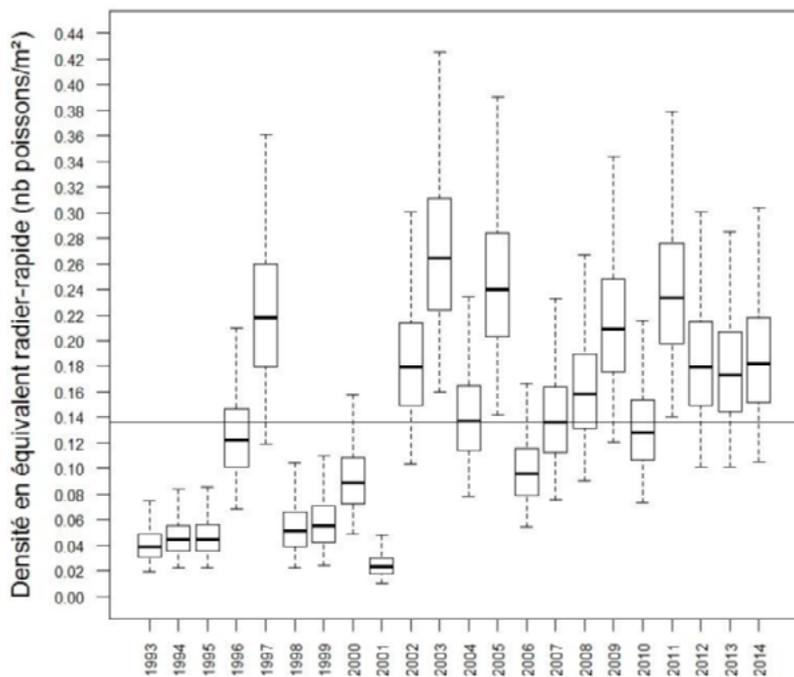


Figure C. Box plots des densités annuelles (en m² équivalent radier-rapide) de tacons (0+) sur la station de Lomener sur le Scorff.

Les box plots représentent ici l'intervalle de crédibilité à 95% et la médiane. La ligne continue représente la moyenne sur la série temporelle. Source: Servanty et Prévost (2016).

À l'échelle du cours d'eau ou du tronçon comportant plusieurs stations

L'indice d'abondance pondéré

Une moyenne pondérée par la surface d'équivalent radier-rapide (SRR) d'un cours d'eau est calculée en considérant que chaque station est représentative d'une partie du tronçon du cours d'eau. Cela permet d'avoir un indice d'abondance moyen à l'échelle du cours d'eau indiquant la capacité d'accueil potentiel en tacons 0+.

Lors du calcul de cette moyenne pondérée, un poids différent est affecté en fonction de la SRR mesurée sur chaque station. Les données de surface d'habitat potentiel pour les juvéniles de saumon sont issues d'études de cartographie d'habitat; elles sont exprimées en surface d'équivalent radier-rapide.

Cet indice permet une comparaison du recrutement en juvéniles de saumon et d'interpréter l'indice d'abondance moyen entre les cours d'eau.

$$IAS \text{ pondéré} = \frac{\sum_i^N (IASat_i \times SRR_i)}{\sum_i^N SRR_i}$$

Avec

SRR: surface d'équivalent radier-rapide de chaque station du cours d'eau exprimée en m² et N le nombre de stations prospectées.

À l'échelle d'un bassin versant, avec un réseau de stations sur un cours d'eau, il est possible d'évaluer la force de recrutement annuel en calculant la moyenne géométrique ou pondérée de l'IAS. Cela permet de comparer les cours d'eau entre eux ou différentes années pour un même cours d'eau ou pour l'ensemble de cours d'eau.

7. Le réglage de l'engin de pêche à l'électricité

La méthode IAS produit des captures par unité d'effort, dont les résultats ont été étalonnés sur les densités réelles. Lors de l'utilisation du courant pulsé crnelé, il est important de respecter une fréquence basse, de l'ordre de 50 Hz. En effet, des tests d'efficacité avec des courants continus et pulsés crnelés sur les salmonidés (saumon atlantique et truite fario), réalisés pour une conductivité autour de 200 µS.cm⁻¹, ont montré des résultats comparables mais des blessures plus nombreuses aux fréquences de 100 et 400 Hz (Pottier *et al.*, 2017). De plus, le rapport cyclique (*duty cycle*) doit être réglé autour de 25 % sur l'engin de pêche à l'électricité, pour éviter la baisse d'efficacité de

capture et l'augmentation des blessures sur les poissons (Dolan and Miranda, 2004; Snyder, 2003, Miranda and Dolan, 2004). L'utilisation du courant pulsé de forme exponentielle est à proscrire du fait de son faible pouvoir attractif.

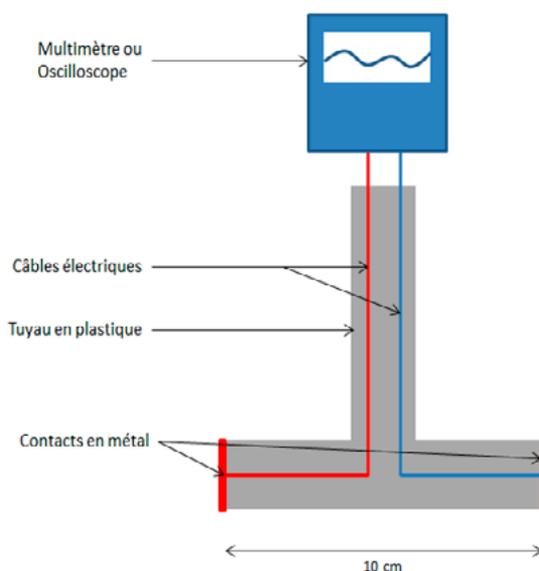


Figure D. Simple sonde Penny pour mesurer le gradient de tension.

Réglage de la tension: la valeur de $0,1 \text{ V.cm}^{-1}$ correspond au seuil théorique moyen de gradient de tension dans l'eau qui induit le phénomène de taxis sur les poissons. Le procédé le plus fiable pour s'assurer d'un rayon d'attraction suffisant est de mesurer le gradient de tension autour de l'anode, grâce à une sonde Penny (nommée par W.G. Hartley car les extrémités étaient constituées de vieilles pièces de monnaie en cuivre; Figure D). Connectée à un voltmètre, la sonde est placée à 150 cm de l'anode. La tension de l'engin de pêche à l'électricité est alors ajustée jusqu'à obtenir la valeur limite de $0,1 \text{ V.cm}^{-1}$. Attention, l'espace entre les 2 capteurs de la sonde étant de 10 cm, la valeur lue sur le voltmètre doit être de 1 V. Actuellement, il n'existe pas de sonde Penny en vente, elle doit être construite.

8. Références

- Bhattacharya, G.G., 1967. A sample method of resolution of a distribution into Gaussian components. *Biometrics* 137, 137–143.
- Dolan, C.R., Miranda, L.E., 2004. Injury and mortality of warmwater fishes immobilized by electrofishing. *North Am. J. Fish. Manag.* 24, 118–127.
- Goulmy, F., 2013. Indice d'abondance en juvéniles du saumon atlantique. Basse Normandie.
- Miranda, L.E., Dolan, C.R., 2004. Electrofishing Power Requirements in Relation to Duty Cycle. *North Am. J. Fish. Manag.* 24, 55–62. <https://doi.org/10.1577/M02-114>
- Pottier, G., Marchand, F., Azam, D., 2017. Comparaison de l'attractivité de différentes formes de courant et de leur impact sur les salmonidés (Saumon atlantique et Truite fario). INRA, 1036 (U3E), Pôle Gest'Aqua, Rennes, France.
- Prévoist, E., Baglinière, J.-L., 1993. Présentation et premiers éléments de mise au point d'une méthode simple d'évaluation du recrutement en juvéniles de saumon atlantique (*Salmo salar*) de l'année en eau courante. Presented at the Premier Forum Halieumétrique, Rennes, pp. 39–48.
- Prévoist, E., Nihouarn, A., 1999. Relation entre indicateur d'abondance de type CPUE et estimation de densité par enlèvements successifs pour les juvéniles de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) de l'année. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 19–29. <https://doi.org/10.1051/kmae:1999018>
- Servanty, S., Prévoist, E., 2016. Mise à jour et standardisation des séries chronologiques d'abondance du saumon atlantique sur les cours d'eau de l'ORE DiaPFC et la Bresle. INRA (Ecobiop), Pôle GEST'AQUA, Saint-Pée sur Nivelle.
- Snyder, D.E., 2003. Electrofishing and its harmful effects on fish (Information and Technology Report USGS/BRD/ITR-2003-0002). U.S. Geological Survey Biological Resources Division. U.S. Government Printing Office, Denver, CO.

VIGITRUITE[®], indice d'abondance truite (IAT)

Jean-Marc Roussel¹

Gaétan Pottier²

Sabrina Servanti³

Laurent Beaulaton⁴

1. Objet et domaine d'application

VIGITRUITE[®] est un protocole standardisé pour estimer l'abondance des juvéniles de truite (*Salmo trutta*) en cours d'eau. Il s'appuie sur un échantillonnage par unité d'effort, unité fixée à 5 minutes de pêche effective, et délivre ainsi des abondances en nombre de juvéniles par 5 minutes. Des abaques pour convertir les abondances en densités sont disponibles, et un guide d'interprétation des densités, de faibles à excellentes, est proposé.

VIGITRUITE[®] permet de mobiliser sur le terrain un nombre réduit de personnes par rapport aux inventaires traditionnels. Le protocole s'applique en cours d'eau jusqu'à 8 m de large où la profondeur n'excède jamais 60 cm. Il a été validé sur des rivières granitiques et calcaires en Bretagne et Normandie.

VIGITRUITE[®] cible spécifiquement les juvéniles de l'année (0+) et les juvéniles d'un an (1+). L'abondance en 0+ renseigne du remplacement des générations (ou recrutement), utile au suivi démographique des populations. L'abondance des 0+ et 1+ est aussi le reflet de la qualité de l'habitat trutticole et des atteintes ponctuelles à son intégrité (pollution, sédimentation, fragmentation notamment). C'est un outil diagnostic des populations de truite et de leurs habitats en cours d'eau.

2. La marque VIGITRUITE[®]

VIGITRUITE[®] est une marque déposée d'INRAE et fait l'objet d'une licence sur savoir-faire. Sa mise en œuvre est soumise au suivi préalable d'une formation spécifique et à une déclaration d'utilisation pouvant donner lieu au versement d'une redevance. L'utilisation de cette marque est donc réglementée.

Contact pour information : jean-marc.roussel@inrae.fr

3. Choix des stations et dates de pêche

Un repérage du cours d'eau est nécessaire préalablement à la pêche. Chaque station choisie doit remplir les critères d'application du protocole (largeur < 8 m ; profondeur < 60 cm) sur un linéaire continue de rivière d'environ 100 m.

Les pêches durant les mois suivant l'émergence (faible efficacité de capture) et durant les plus fortes températures estivales sont évitées, l'indice d'abondance est réalisé à l'automne (septembre, octobre, novembre).

4. Matériel requis

- Un appareil de pêche portatif, délivrant un courant de tension 200-350 V. Pour des raisons d'autonomie des batteries, un courant pulsé crénelé de fréquence 50 Hz, peut être utilisé. L'appareil de pêche doit être équipé d'un compteur de temps en minutes et secondes.
- Deux épuisettes de 20-30 cm de diamètre et vide de mailles 4 mm.
- Une épuisette semi circulaire de 60 cm de diamètre et vide de mailles 4 mm.
- Un seau.
- Un compteur à main.
- Un décamètre à ruban.
- Deux piquets balises pour repérer le début et la fin de la station de pêche.

1 INRAE, 1036, ESE, Unité expérimentale Écologie et santé des écosystèmes, Pôle pour la gestion des migrateurs amphihalins dans leur environnement, F-35042, Rennes, France

2 HYDRECO, F-97388 Kourou, France

3 INRAE, 1036, U3E, Unité expérimentale d'écologie et d'écotoxicologie aquatique, Pôle pour la gestion des migrateurs amphihalins dans leur environnement, F-35042, Rennes, France

4 OFB, Pôle pour la gestion des migrateurs amphihalins dans leur environnement, Direction de la recherche et de l'appui scientifique, F-35042 Rennes, France

5. Moyens humains

La récolte des données sur le terrain nécessite une équipe de 4 personnes :

- un opérateur en charge de l'appareil de pêche à l'électricité;
- un pêcheur qui manœuvre l'épuisette circulaire plaquée sur le fond et une petite épuisette;
- un second pêcheur équipé d'une épuisette et du compteur à main;
- un porteur de seau qui collecte les poissons et veille à leur état de santé.

En présence d'un personnel expérimenté, VIGITRUIITE® peut être mise en œuvre par une équipe de 3 personnes. Dans ce cas, le second pêcheur, normalement moins sollicité pour capturer les truitelles, porte une petite épuisette et le seau.

6. Protocole

Sur la station choisie, le protocole VIGITRUIITE® a été conçu pour que l'échantillonnage soit représentatif de la gamme des conditions d'habitat disponibles, sans *a priori* sur les préférences d'habitat de l'espèce. Cette condition est centrale pour répondre à l'objectif de standardisation, permettre la comparaison de résultats provenant de divers opérateurs et de différents cours d'eau, et autoriser l'utilisation des abaques de conversion en densités pour 100 m².

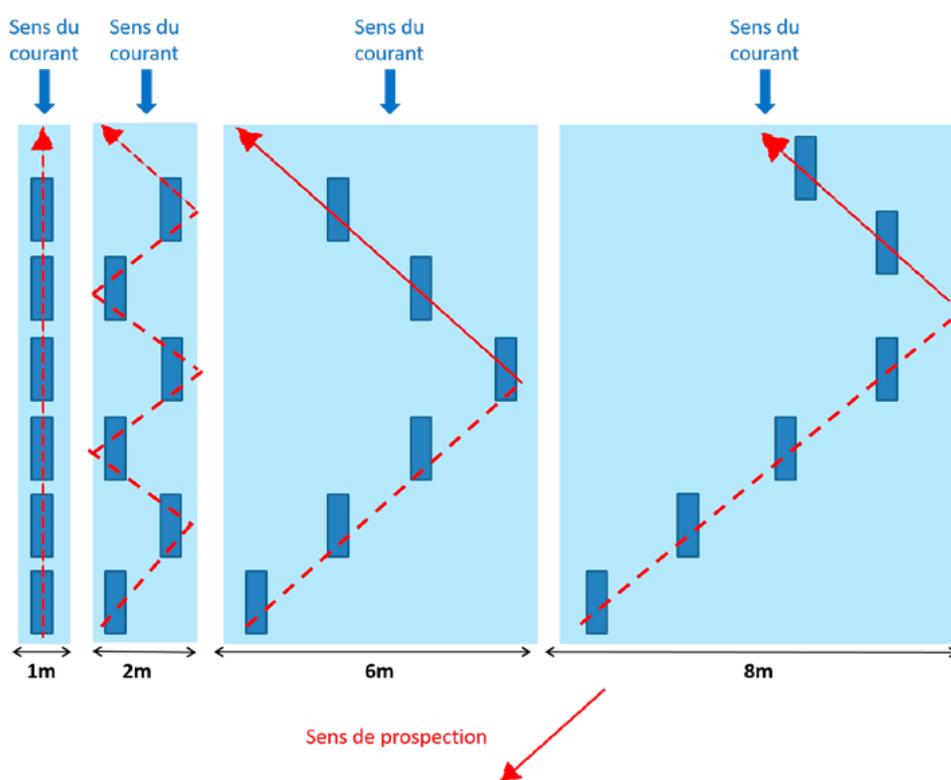
L'ensemble des consignes suivantes doit être respecté. C'est la garantie de produire des estimations standardisées s'inscrivant dans la démarche qualité compatible avec les bases de données nationales. Dans ce sens, il est impératif à tout nouvel utilisateur de suivre la formation spécifique à la mise en œuvre de VIGITRUIITE®.

1. Après mise à zéro du compteur de l'appareil de pêche et du compteur à main, l'opérateur progresse d'aval en amont dans le cours d'eau. Il est suivi par le pêcheur principal équipé des 2 épuisettes, qui doit respecter les consignes de déplacement que lui donne l'opérateur, ainsi que par le second pêcheur.
2. L'opérateur suit une trajectoire prédéfinie en zigzag qui l'amène d'une berge à l'autre le long de diagonales successives, en respectant un angle d'environ 45° par rapport aux berges (Figure A). Sur son trajet, il fait des traits d'électrode d'environ 2 mètres de long, parallèlement au courant, et de l'amont vers l'aval. Après avoir réalisé le premier trait le long de la berge, l'opérateur doit visualiser le trait suivant avant de se déplacer: il sera placé sur la diagonale, sa limite aval toujours à l'amont du trait précédent. En fin de diagonale, si l'espace est trop court pour un trait le long de la berge, le trait sera placé sur la diagonale suivante, toujours à l'amont du trait précédent pour éviter les chevauchements (Figure A).
3. Une fois l'emplacement du trait visualisé, l'opérateur indique au pêcheur principal où immerger son épuisette semi circulaire, soit à l'amont du trait précédent et décalé sur la diagonale. Le pêcheur veille à ce que l'épuisette soit bien plaquée au fond. En cas de difficulté pour placer l'épuisette, l'opérateur peut décider de décaler sensiblement la position du trait. Le trait est réalisé, puis l'emplacement du trait suivant est visualisé, et ainsi de suite. Il en résulte un échantillonnage par traits régulièrement espacés d'une berge à l'autre, couvrant un linéaire de cours d'eau comparable quelle que soit la largeur en eau de la rivière (Figure A). Les 2 piquets balisant les limites aval et amont de la station de pêche sont également posés.
4. Pour chaque trait, l'opérateur immerge l'électrode environ 2 mètres à l'amont de l'épuisette à fond plat. Le contact est mis lors de la pénétration de l'anode dans l'eau. Le pêcheur capture les poissons visibles à l'aide de sa petite épuisette, mais sans bouger la grande. Le second pêcheur se tient prêt à intervenir en cas de forte abondance. Durant cette opération, il est important que les pêcheurs capturent uniquement les juvéniles de l'année (0+) et d'un an (1+). La présence d'individus de grandes tailles et plus âgés (sub-adultes ou adultes) ne doit pas entraîner de baisse de la concentration de l'équipe vis-à-vis des juvéniles. Le compteur à main est incrémenté d'une unité à la fin de chaque trait.
5. En fin de trait, l'opérateur laisse l'anode à l'entrée de la grande épuisette 1 à 2 secondes avant de couper le contact en indiquant au pêcheur de relever simultanément l'épuisette à fond plat. Le trait réalisé est comptabilisé grâce au compteur à main que manipule le porteur de seau. Une fois les poissons collectés mis dans le seau, le pêcheur suit les consignes de l'opérateur pour remettre en place la grande épuisette en vue du trait suivant.
6. Lorsque les cinq minutes de pêche approchent, le compteur de temps doit être vérifié avant tout nouveau trait d'électrode. L'échantillonnage de la station se termine lorsque le temps de pêche efficace (temps cumulé des impulsions électriques dans l'eau) atteint au moins 5 minutes au compteur; aucun nouveau trait d'électrode ne doit être entrepris si le compteur affiche déjà 5 minutes.

Une fois la pêche de la station terminée, l'équipe se sépare en 2 pour réaliser les deux tâches obligatoires suivantes.

7. Le nombre d'individus de l'année (0+) et d'un an (1+) est compté. Il peut s'avérer nécessaire de mesurer la longueur des individus et de prendre des écailles pour distinguer ultérieurement les 0+, les 1+ et éliminer les individus plus âgés. Deux personnes sont nécessaires pour la manipulation des poissons et la prise de note.
8. À l'aide du décimètre, la largeur au piquet aval est mesurée, sa valeur notée. Puis une nouvelle mesure de largeur est faite en progressant de 10 mètres vers l'amont, ainsi de suite jusqu'à l'approche de la fin de la station. Le cas échéant, l'écart restant jusqu'au piquet amont (moins de 10 m donc) est mesurée pour compléter la mesure de longueur de la station. Ce travail peut être réalisé par une personne seule, en équipant le décimètre d'un petit piquet métallique en son extrémité zéro, qui sera planté dans la berge à chaque nouvelle mesure.

Figure A. Position des traits d'électrode (rectangles bleus) pour quatre cours d'eau de largeur comprise entre 1 et 8 mètres. La flèche rouge en pointillés indique la progression de l'équipe de pêche d'une berge à l'autre, vers l'amont. Quelle que soit la largeur de la rivière, le linéaire de berge parcouru pour un nombre donné de traits d'électrode (ici, 6 traits) est constant.



7. Rapportage des résultats

Le rapportage des résultats VIGITRUIITE® s'inscrit dans une démarche qualité dont les critères d'évaluation portent sur le déroulement des opérations de pêche sur chaque station. Ces critères doivent être systématiquement rapportés.

1. Le temps de pêche, en minutes et secondes
2. Le nombre de traits réalisés, qui doit être compris entre 33 et 43
3. La longueur de la station, qui doit être comprise entre 60 m et 80 m
4. La largeur moyenne de la station, qui doit être comprise entre 1 m et 8 m
5. Le nombre de truitelles 0+ pêchées en 5 minutes
6. Le nombre de truitelles 1+ pêchés en 5 minutes

Si nécessaire, des abaques de conversion du nombre d'individus capturés en densité pour 100 m² sont disponibles, Tableau A pour les 0+, Tableau B pour les 1+. On y lit la densité la plus probable, ainsi que les intervalles de confiance à 95 %, en fonction du nombre d'individus capturés en 5 min et de la largeur moyenne du cours d'eau. À noter que la conversion en densité n'est pas disponible pour les truitelles 1+ en cours d'eau compris entre 5 m et 8 m de large. Des classes de densité, de faible à excellente, sont proposées et visualisées par des codes couleur.

PARTIE D. LIVRETS DE PROTOCOLES DE PÊCHE À L'ÉLECTRICITÉ

Tableau A. Table de conversion des CPUE (nombre de truites pêchées en 5 min, en ligne) en densités pour les truites 0+, en fonction de la largeur du cours d'eau (en colonne)

Pour chaque cas, la densité la plus probable, et l'intervalle de confiance à 95 % [], sont exprimés en nombre d'individus par 100 m². Ces valeurs sont issues d'une modélisation bayésienne présentée dans Servanty et al. (2017) à partir des données originelles obtenues par Roussel et al. (2004).

Un code couleur est proposé pour l'interprétation: rouge = densité faible (moins de 10 individus par 100 m²), orange = densité moyenne (entre 10 et 20 individus par 100 m²), jaune = densité bonne (entre 20 et 30 individus par 100 m²), vert = densité très bonne (entre 30 et 40 individus par 100 m²), bleu = densité excellente (plus de 40 individus par 100 m²).

À noter qu'on ne peut exclure la présence de truite 0+ même avec une CPUE égale à zéro. La table de conversion est valable pour des cours d'eau de moins de 8 m de large, et des CPUE inférieures à 40 individus par 5 min. Les abondances supérieures à 40 individus par m² peuvent être néanmoins considérées comme excellentes.

CPUE	Largeur de la rivière (en mètre)										
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8
0	1,76 [0, 7,76]	1,55 [0, 6,65]	1,45 [0, 6,03]	1,37 [0, 5,84]	1,29 [0, 5,54]	1,26 [0, 5,34]	1,22 [0, 5,27]	1,14 [0, 4,93]	1,1 [0, 4,79]	1,06 [0, 4,63]	1,02 [0, 4,45]
1	3,24 [0,56, 10,55]	2,94 [0,51, 9,3]	2,73 [0,5, 8,45]	2,61 [0,44, 7,9]	2,47 [0,45, 7,58]	2,36 [0,42, 7,2]	2,25 [0,37, 7,01]	2,12 [0,35, 6,68]	2,02 [0,36, 6,71]	1,9 [0,31, 6,43]	1,9 [0,32, 6,37]
2	4,63 [1,08, 12,92]	4,28 [1,01, 11,72]	3,92 [0,93, 10,56]	3,71 [0,87, 9,95]	3,55 [0,86, 9,32]	3,39 [0,78, 9,01]	3,28 [0,76, 8,76]	3,07 [0,72, 8,49]	2,91 [0,66, 8,17]	2,81 [0,66, 7,93]	2,7 [0,62, 7,95]
3	6,13 [1,72, 15,36]	5,48 [1,52, 13,64]	5,08 [1,44, 12,36]	4,79 [1,37, 11,75]	4,56 [1,3, 11,2]	4,44 [1,25, 10,71]	4,25 [1,18, 10,49]	4,04 [1,12, 9,96]	3,81 [1,06, 9,64]	3,64 [1,1, 9,42]	3,56 [0,94, 9,43]
4	7,49 [2,37, 17,99]	6,72 [2,19, 15,48]	6,28 [2,07, 14,11]	5,88 [1,93, 13,18]	5,63 [1,83, 12,68]	5,45 [1,78, 12,29]	5,24 [1,72, 11,97]	4,94 [1,6, 11,37]	4,73 [1,5, 11,01]	4,5 [1,42, 10,84]	4,32 [1,31, 10,57]
5	8,92 [3,1, 20,23]	7,96 [2,88, 17,24]	7,48 [2,69, 16,07]	7,03 [2,5, 15,08]	6,67 [2,38, 14,4]	6,47 [2,28, 13,87]	6,19 [2,25, 13,31]	5,88 [2,1, 12,99]	5,51 [1,93, 12,32]	5,32 [1,85, 12,14]	5,1 [1,76, 12,02]
6	10,33 [3,86, 21,92]	9,25 [3,58, 19,25]	8,57 [3,3, 17,64]	8,1 [3,14, 16,72]	7,76 [3,1, 16,27]	7,36 [2,91, 15,24]	7,17 [2,77, 14,88]	6,74 [2,59, 14,03]	6,44 [2,42, 13,85]	6,15 [2,31, 13,44]	5,9 [2,2, 13,34]
7	11,57 [4,61, 23,98]	10,48 [4,35, 21]	9,76 [4,1, 19,2]	9,27 [3,83, 18,11]	8,74 [3,65, 17,17]	8,44 [3,47, 16,71]	8,14 [3,36, 16,27]	7,67 [3,15, 15,55]	7,33 [2,95, 15,22]	6,99 [2,8, 14,68]	6,76 [2,63, 14,66]
8	13,01 [5,44, 26,34]	11,78 [5,14, 23,02]	10,97 [4,7, 21,1]	10,34 [4,51, 19,58]	9,97 [4,22, 18,73]	9,46 [4,12, 18,11]	9,06 [3,96, 17,61]	8,64 [3,71, 16,77]	8,19 [3,45, 16,5]	7,85 [3,29, 16,01]	7,53 [3,15, 15,85]
9	14,38 [6,24, 28,46]	13,09 [5,97, 24,27]	12,12 [5,52, 22,66]	11,46 [5,18, 21,3]	10,94 [4,97, 20,14]	10,49 [4,81, 19,56]	10,16 [4,62, 19,09]	9,5 [4,21, 18,35]	9,03 [4,1, 17,7]	8,7 [3,78, 17,29]	8,31 [3,58, 17,22]
10	15,76 [7,07, 30,36]	14,33 [6,74, 26,32]	13,19 [6,29, 23,83]	12,48 [5,83, 22,71]	11,89 [5,65, 21,4]	11,5 [5,45, 20,89]	11,01 [5,2, 20,31]	10,43 [4,8, 19,63]	9,91 [4,54, 19,19]	9,43 [4,3, 18,5]	9,16 [4,05, 18,51]
11	17,2 [8,08, 32,62]	15,6 [7,45, 28,3]	14,47 [6,98, 25,88]	13,63 [6,69, 24,23]	12,97 [6,35, 22,83]	12,48 [6,12, 22,28]	12,09 [5,81, 21,51]	11,36 [5,43, 21]	10,79 [5,15, 20,18]	10,36 [4,82, 20,05]	9,88 [4,54, 19,83]
12	18,65 [8,93, 34,65]	16,85 [8,34, 30,13]	15,58 [7,84, 27,41]	14,78 [7,46, 25,71]	14,03 [7,02, 24,59]	13,49 [6,77, 23,44]	13,04 [6,53, 23,07]	12,28 [6,03, 22,22]	11,64 [5,65, 21,75]	11,22 [5,3, 21,22]	10,82 [5,06, 20,94]
13	19,95 [9,83, 37,1]	18,05 [9,21, 31,66]	16,83 [8,65, 28,83]	15,82 [8,14, 26,81]	15,03 [7,89, 25,7]	14,45 [7,43, 24,88]	13,97 [7,09, 24,03]	13,19 [6,66, 23,6]	12,48 [6,23, 23,05]	12,06 [5,99, 22,62]	11,54 [5,51, 22,09]
14	21,49 [10,74, 39,04]	19,34 [10,09, 33,41]	17,92 [9,4, 30,39]	16,87 [9,03, 28,63]	16,13 [8,52, 27,13]	15,49 [8,11, 26,46]	15,07 [7,8, 25,69]	14,09 [7,2, 24,85]	13,43 [6,78, 23,95]	12,83 [6,36, 23,72]	12,49 [6,04, 23,35]
15	22,77 [11,6, 40,92]	20,52 [10,95, 35,05]	19,13 [10,32, 31,97]	18,06 [9,82, 29,99]	17,18 [9,26, 28,68]	16,54 [8,88, 27,54]	16,02 [8,5, 27,1]	14,98 [7,86, 26,16]	14,3 [7,37, 25,61]	13,65 [6,98, 24,93]	13,18 [6,56, 24,84]
16	24,23 [12,47, 43,22]	21,74 [11,7, 36,84]	20,24 [11,13, 33,39]	19,24 [10,45, 31,49]	18,19 [10,06, 29,76]	17,58 [9,6, 29,12]	16,95 [9,28, 28,19]	16,01 [8,46, 27,66]	15,26 [8,2, 26,61]	14,49 [7,46, 26,66]	13,99 [7,13, 26,01]
17	25,53 [13,3, 44,83]	23,15 [12,71, 38,27]	21,45 [12,08, 34,89]	20,23 [11,25, 32,94]	18,54 [10,62, 31,12]	17,85 [10,26, 30,23]	17,03 [9,94, 29,58]	16,87 [9,21, 28,77]	16,01 [8,51, 27,88]	15,36 [8,02, 27,29]	14,92 [7,55, 27,46]
18	26,86 [14,32, 46,74]	24,27 [13,48, 40,23]	22,66 [12,87, 36,69]	21,43 [12,12, 34,11]	20,41 [11,49, 32,84]	19,61 [11,02, 31,8]	18,96 [10,61, 30,97]	17,84 [9,74, 29,86]	17,06 [9,25, 29,18]	16,39 [8,6, 28,55]	15,77 [8,04, 28,39]
19	28,3 [15,31, 49,03]	25,54 [14,44, 41,77]	23,71 [13,6, 37,94]	22,35 [12,78, 35,38]	21,38 [12,33, 34,17]	20,6 [11,96, 32,97]	19,75 [11,28, 32]	18,7 [10,51, 31,09]	17,76 [9,82, 30,13]	17,04 [9,2, 30]	16,42 [8,72, 29,61]
20	29,74 [16,13, 50,79]	26,86 [15,38, 43,52]	24,86 [14,41, 39,56]	23,57 [13,72, 36,9]	22,45 [13,14, 35,18]	21,62 [12,59, 34,75]	20,77 [12,03, 33,52]	19,6 [11,04, 32,31]	18,63 [10,39, 31,49]	17,86 [9,69, 31,25]	17,25 [9,27, 30,96]
21	31,14 [17,12, 53,17]	28,11 [15,95, 44,97]	26,02 [15,21, 40,98]	24,6 [14,46, 38,37]	23,51 [13,85, 36,76]	22,6 [13,27, 35,63]	21,8 [12,75, 34,92]	20,57 [11,76, 33,67]	19,49 [10,94, 32,83]	18,75 [10,25, 32,6]	18,11 [9,75, 32,42]
22	32,48 [17,9, 55,05]	29,37 [17,18, 46,71]	27,26 [16,14, 42,67]	25,76 [15,32, 39,73]	24,55 [14,71, 38,02]	23,58 [14,02, 36,84]	22,79 [13,34, 35,89]	21,47 [12,35, 34,51]	20,45 [11,45, 33,97]	19,54 [10,89, 33,53]	18,84 [10,33, 33,25]
23	33,88 [18,91, 56,8]	30,71 [18,48, 48,11]	28,46 [17,12, 44,31]	27,06 [16,3, 41,47]	25,64 [15,52, 39,11]	24,7 [14,89, 38,13]	23,73 [14,19, 36,95]	22,19 [12,91, 35,84]	21,32 [12,12, 35,58]	20,43 [11,4, 34,75]	19,67 [10,83, 34,41]
24	35,2 [20,09, 59,27]	31,9 [18,85, 50,64]	30,61 [18,45, 47]	29,08 [17,03, 42,62]	27,56 [16,36, 40,71]	26,66 [15,54, 39,23]	25,67 [15,01, 38,31]	24,21 [13,78, 37,14]	23,06 [12,8, 36,93]	22,09 [12,05, 36,14]	21,34 [11,32, 35,45]
25	36,55 [20,77, 60,53]	33,19 [19,78, 51,58]	31,97 [18,76, 46,79]	30,13 [17,92, 44,09]	29,08 [16,98, 41,8]	27,94 [16,36, 40,79]	26,66 [15,8, 39,66]	25,03 [14,46, 38,36]	23,9 [13,47, 37,8]	22,91 [12,65, 37,05]	22,2 [11,8, 37,11]
26	37,95 [21,8, 63,1]	34,32 [20,69, 53,35]	31,97 [19,76, 48,78]	30,13 [18,78, 45,67]	28,63 [17,69, 43,34]	27,67 [17,02, 41,71]	26,66 [16,29, 40,78]	25,03 [15,16, 39,8]	23,9 [13,86, 39,17]	22,91 [13,21, 38,57]	22,2 [12,48, 38,14]
27	39,54 [22,7, 64,24]	35,6 [21,61, 54,31]	33,23 [20,39, 50,11]	31,17 [19,41, 46,95]	29,78 [18,61, 44,5]	28,53 [17,56, 43,34]	27,61 [17,09, 42,27]	25,98 [15,81, 40,68]	24,89 [14,69, 40,58]	23,79 [13,82, 39,62]	22,81 [13,02, 39,24]
28	40,74 [23,64, 66,71]	36,86 [22,44, 56,84]	34,29 [21,58, 51,31]	32,48 [20,46, 48,01]	30,88 [19,48, 45,89]	29,64 [18,52, 44,67]	28,65 [17,82, 43,1]	26,93 [16,45, 42,07]	25,69 [15,42, 41,41]	24,63 [14,25, 40,8]	23,78 [13,6, 40,35]
29	42,22 [24,55, 68,86]	38,26 [23,54, 58,68]	35,43 [22,22, 52,85]	33,52 [21,59, 49,84]	32,01 [20,27, 47,4]	30,62 [19,39, 45,75]	29,63 [18,47, 44,69]	27,86 [17,21, 43,23]	26,39 [15,88, 42,41]	25,34 [14,8, 42,13]	24,51 [14,08, 41,43]
30	43,58 [25,69, 70,92]	39,39 [24,58, 60,58]	36,66 [23,14, 54,38]	34,52 [22,2, 50,75]	32,84 [20,9, 48,39]	31,63 [19,27, 46,91]	30,42 [18,27, 45,62]	28,85 [17,91, 44,16]	27,36 [16,54, 43,54]	26,23 [15,46, 43,65]	25,35 [14,62, 42,5]
31	44,92 [26,67, 73,05]	40,5 [25,61, 63]	37,83 [24,22, 55,82]	35,82 [23,07, 52,42]	33,98 [21,98, 49,71]	32,6 [20,87, 48,01]	31,43 [19,01, 47,2]	29,71 [18,61, 45,77]	28,18 [17,02, 45,19]	27,12 [16,06, 44,66]	26,17 [15,18, 44,3]
32	46,25 [27,65, 74,01]	41,83 [26,53, 63,24]	38,85 [25,13, 57,29]	36,85 [23,88, 53,69]	34,97 [22,61, 51,07]	33,7 [21,77, 49,35]	32,49 [20,78, 48,55]	30,6 [19,06, 47,08]	29,23 [17,9, 46,36]	27,77 [16,59, 45,89]	26,94 [15,75, 44,91]
33	47,61 [28,68, 76,32]	43,08 [27,48, 64,85]	40,21 [25,94, 58,74]	37,94 [24,67, 54,87]	36,12 [22,45, 50,63]	34,64 [21,51, 49,57]	33,48 [19,85, 48,9]	31,52 [18,33, 47,71]	29,94 [17,52, 46,67]	28,8 [16,11, 46,67]	27,77 [15,72, 46,67]
34	49,05 [29,63, 77,86]	44,36 [28,17, 66,65]	41,27 [26,83, 60,39]	39,16 [25,58, 56,19]	37,22 [24,37, 53,78]	35,62 [23,25, 51,93]	34,45 [22,21, 50,76]	32,39 [20,43, 49,61]	30,87 [18,93, 48,73]	29,64 [17,87, 48,04]	28,61 [17,12, 47,46]
35	50,44 [30,83, 80,9]	45,5 [29,04, 68,51]	42,44 [27,7, 61,6]	39,89 [26,47, 57,39]	38,18 [25,21, 54,76]	36,56 [24,06, 53,34]	35,3 [22,81, 52,21]	33,46 [21,31, 50,64]	31,77 [19,81, 49,67]	30,54 [18,44, 49,54]	29,44 [17,28, 49,08]
36	51,83 [31,64, 82,71]	46,84 [30,7, 70,41]	43,58 [28,54, 63,09]	40,29 [27,3, 58,94]	39,19 [26,18, 56,25]	37,64 [24,68, 54,5]	36,29 [23,89, 53,37]	34,15 [21,79, 51,91]	32,6 [20,2, 51,02]	31,15 [18,94, 50,56]	30,19 [17,92, 50,02]
37	53,37 [32,45, 84,1]	48,24 [31,08, 72,08]	44,68 [29,58, 64,72]	40,79 [28,2, 60]	40,43 [28,6, 61,5]	38,64 [25,56, 55,92]	37,29 [24,47, 54,44]	35,25 [22,61, 53,31]	33,32 [21,08, 51,64]	32,19 [19,65, 51,57]	30,89 [18,35, 51,16]
38	54,88 [33,3, 86,28]	49,41 [32,11, 73,32]	46 [30,55, 65,17]	43,37 [29,21, 61,72]	41,38 [27,82, 58,67]	39,58 [26,39, 57,02]	38,23 [26,1, 55,82]	36,07 [23,31, 54,38]	34,39 [21,49, 52,55]	32,95 [20,49, 52,84]	31,87 [18,83, 52,76]
39	56,07 [34,65, 88,28]	50,71 [32,71, 74,73]	47,04 [31,48, 67,4]	44,48 [30,02, 63,01]	42,4 [28,58, 60,19]	40,8 [27,23, 58,3]	39,39 [26,15, 57,14]	36,9 [23,88, 55,63]	35,3 [22,33, 54,63]	33,84 [20,99, 54,46]	32,59 [19,5, 54,11]
40	57,41 [35,41, 90,07]	51,7 [33,7, 76,26]	48,18 [32,11, 68,82]	45,5 [30,8							

PARTIE D. LIVRETS DE PROTOCOLES DE PÊCHE À L'ÉLECTRICITÉ

Tableau B. Table de conversion des CPUE (nombre de truites pêchées en 5 min, en ligne) en densités pour les truites 1+, en fonction de la largeur du cours d'eau (en colonne)

Pour chaque cas, la densité la plus probable, et l'intervalle de confiance à 95 % [], sont exprimées en nombre d'individus par 100 m². Ces valeurs sont issues d'une modélisation bayésienne présentée dans Servanty et al. (2017) à partir des données originelles obtenues par Roussel et al. (2004).

Un code couleur est proposé pour l'interprétation: rouge = densité faible (moins de 5 individus par 100 m²), orange = densité moyenne (entre 5 et 10 individus par 100 m²), jaune = densité bonne (entre 10 et 15 individus par 100 m²), vert = densité très bonne (entre 15 et 20 individus par 100 m²), bleu = densité excellente (plus de 20 individus par 100 m²).

À noter qu'on ne peut exclure la présence de truite 1+ même avec une CPUE égale à zéro. La table de conversion est valable pour des cours d'eau de moins de 5 m de large, et des CPUE inférieures à 30 individus par 5 min. Les abondances supérieures à 30 individus par m² peuvent être néanmoins considérées comme excellentes.

CPUE	Largeur de la rivière (en mètre)							
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
0	2,7 [0 ; 8,87]	2,27 [0 ; 7,39]	1,98 [0 ; 6,39]	1,75 [0 ; 5,53]	1,62 [0 ; 5,15]	1,48 [0 ; 4,71]	1,38 [0 ; 4,5]	1,2 [0 ; 4,07]
1	3,97 [0,96 ; 11,17]	3,36 [0,81 ; 9,08]	2,92 [0,7 ; 7,81]	2,6 [0,61 ; 6,92]	2,37 [0,57 ; 6,35]	2,17 [0,53 ; 5,89]	2,01 [0,47 ; 5,51]	1,77 [0,42 ; 4,98]
2	5,18 [1,48 ; 13,12]	4,34 [1,27 ; 10,73]	3,83 [1,14 ; 9,28]	3,34 [0,98 ; 8,24]	3,04 [0,89 ; 7,48]	2,85 [0,84 ; 7]	2,62 [0,77 ; 6,41]	2,31 [0,65 ; 5,8]
3	6,31 [2,06 ; 15,3]	5,28 [1,75 ; 12,36]	4,64 [1,5 ; 10,59]	4,15 [1,38 ; 9,46]	3,77 [1,27 ; 8,49]	3,46 [1,17 ; 7,95]	3,23 [1,06 ; 7,34]	2,84 [0,93 ; 6,73]
4	7,43 [2,59 ; 17,06]	6,31 [2,29 ; 13,77]	5,51 [2,04 ; 11,93]	4,9 [1,78 ; 10,54]	4,47 [1,69 ; 9,5]	4,1 [1,54 ; 8,81]	3,81 [1,37 ; 8,4]	3,38 [1,21 ; 7,55]
5	8,62 [3,21 ; 18,85]	7,22 [2,8 ; 15,45]	6,29 [2,46 ; 13,1]	5,66 [2,25 ; 11,71]	5,14 [2,05 ; 10,67]	4,7 [1,86 ; 9,83]	4,39 [1,74 ; 9,43]	3,94 [1,52 ; 8,33]
6	9,81 [3,9 ; 20,77]	8,16 [3,4 ; 16,82]	7,19 [2,99 ; 14,48]	6,38 [2,68 ; 12,64]	5,84 [2,47 ; 11,56]	5,39 [2,26 ; 10,83]	5,02 [2,08 ; 10,13]	4,38 [1,79 ; 9,13]
7	10,87 [4,47 ; 22,36]	9,18 [3,93 ; 18,19]	7,98 [3,49 ; 15,67]	7,23 [3,14 ; 13,81]	6,49 [2,87 ; 12,63]	6,03 [2,63 ; 11,81]	5,59 [2,42 ; 10,96]	4,92 [2,07 ; 10,1]
8	11,95 [5,16 ; 24,36]	10,13 [4,5 ; 19,53]	8,87 [3,99 ; 16,73]	7,86 [3,67 ; 14,85]	7,19 [3,3 ; 13,59]	6,66 [3,03 ; 12,58]	6,18 [2,8 ; 11,96]	5,44 [2,42 ; 10,7]
9	13,16 [5,85 ; 26,31]	11,04 [5,12 ; 21,08]	9,64 [4,56 ; 17,88]	8,65 [4,08 ; 15,9]	7,88 [3,71 ; 14,44]	7,23 [3,46 ; 13,54]	6,75 [3,18 ; 12,69]	5,96 [2,73 ; 11,56]
10	14,21 [6,44 ; 27,72]	11,94 [5,68 ; 22,28]	10,53 [5,08 ; 19,41]	9,4 [4,6 ; 16,93]	8,56 [4,24 ; 15,54]	7,86 [3,83 ; 14,24]	7,26 [3,51 ; 13,48]	6,47 [3,06 ; 12,37]
11	15,32 [7,08 ; 29,8]	12,92 [6,29 ; 23,89]	11,36 [5,63 ; 20,24]	10,12 [5,03 ; 17,99]	9,21 [4,65 ; 16,4]	8,47 [4,24 ; 15,23]	7,95 [3,96 ; 14,46]	6,98 [3,44 ; 13,16]
12	16,44 [7,91 ; 31,6]	13,81 [6,85 ; 25,41]	12,2 [6,14 ; 21,51]	10,87 [5,53 ; 19,09]	9,9 [5,08 ; 17,56]	9,16 [4,7 ; 16,24]	8,53 [4,39 ; 15,33]	7,47 [3,74 ; 13,75]
13	17,55 [8,54 ; 33,05]	14,9 [7,57 ; 26,99]	12,95 [6,74 ; 22,67]	11,62 [6,12 ; 20,26]	10,6 [5,56 ; 18,41]	9,72 [5,05 ; 17,1]	9,11 [4,76 ; 15,98]	8,02 [4,12 ; 14,61]
14	18,65 [9,17 ; 34,57]	15,76 [8,15 ; 28,11]	13,9 [7,34 ; 23,94]	12,36 [6,64 ; 21,12]	11,22 [6,03 ; 19,19]	10,4 [5,56 ; 17,85]	9,72 [5,15 ; 16,94]	8,52 [4,39 ; 15,38]
15	19,77 [9,83 ; 36,41]	16,74 [8,66 ; 29,51]	14,57 [7,86 ; 24,85]	13,05 [7,11 ; 22,1]	11,91 [6,62 ; 20,23]	10,93 [5,96 ; 18,52]	10,27 [5,5 ; 17,78]	9,05 [4,72 ; 16,3]
16	21,02 [10,64 ; 38,37]	17,6 [9,29 ; 30,81]	15,38 [8,28 ; 26,18]	13,85 [7,64 ; 23,2]	12,64 [6,99 ; 21,1]	11,63 [6,47 ; 19,55]	10,8 [5,93 ; 18,37]	9,54 [5,11 ; 16,94]
17	22,07 [11,37 ; 40,26]	18,54 [9,98 ; 31,92]	16,25 [8,92 ; 27,6]	14,54 [8,06 ; 24,18]	13,29 [7,42 ; 21,98]	12,29 [6,82 ; 20,64]	11,39 [6,34 ; 19,16]	10,04 [5,44 ; 17,47]
18	23,19 [11,91 ; 41,98]	19,59 [10,61 ; 33,33]	17,1 [9,64 ; 28,38]	15,4 [8,64 ; 25,23]	13,98 [8,03 ; 22,86]	12,88 [7,32 ; 21,17]	11,98 [6,76 ; 20,3]	10,59 [5,83 ; 18,39]
19	24,28 [12,55 ; 43,47]	20,44 [11,19 ; 34,8]	17,95 [10,14 ; 29,6]	16,05 [9,27 ; 26,21]	14,66 [8,41 ; 23,75]	13,45 [7,74 ; 22]	12,52 [7,14 ; 20,99]	11,09 [6,17 ; 19,12]
20	25,43 [13,3 ; 45,22]	21,43 [12,03 ; 36,36]	18,74 [10,82 ; 30,87]	16,78 [9,73 ; 27,14]	15,31 [8,9 ; 24,63]	14,13 [8,19 ; 22,94]	13,08 [7,57 ; 21,68]	11,62 [6,51 ; 20,02]
21	26,55 [14,01 ; 47,04]	22,38 [12,52 ; 37,67]	19,61 [11,3 ; 32,09]	17,68 [10,3 ; 28,05]	15,99 [9,36 ; 25,71]	14,77 [8,68 ; 23,8]	13,7 [7,95 ; 22,51]	12,12 [6,82 ; 20,79]
22	27,69 [14,57 ; 48,71]	23,24 [13,2 ; 38,74]	20,37 [11,87 ; 32,82]	18,38 [10,89 ; 29,14]	16,71 [9,86 ; 26,6]	15,39 [9,04 ; 24,6]	14,33 [8,38 ; 23,29]	12,55 [7,25 ; 21,28]
23	28,87 [15,51 ; 50,27]	24,24 [13,85 ; 40,18]	21,23 [12,57 ; 34,06]	19,03 [11,32 ; 30,02]	17,42 [10,37 ; 27,49]	15,92 [9,6 ; 25,45]	14,88 [8,91 ; 24,1]	13,09 [7,61 ; 21,98]
24	29,77 [16,31 ; 51,89]	25,19 [14,41 ; 41,54]	22,11 [13 ; 35,16]	19,78 [11,89 ; 31,3]	18,09 [10,76 ; 28,37]	16,56 [9,97 ; 26,06]	15,47 [9,23 ; 24,89]	13,68 [7,88 ; 22,85]
25	31,07 [16,77 ; 54,02]	26,19 [15,07 ; 42,97]	22,99 [13,72 ; 36,34]	20,51 [12,45 ; 32,12]	18,69 [11,51 ; 29,14]	17,3 [10,51 ; 27,04]	16,03 [9,65 ; 25,67]	14,19 [8,28 ; 23,56]
26	32,18 [17,55 ; 55,29]	27,14 [15,61 ; 44,3]	23,72 [14,13 ; 37,63]	21,21 [12,96 ; 33,18]	19,36 [11,8 ; 30,02]	17,83 [10,89 ; 27,85]	16,67 [10,06 ; 26,48]	14,74 [8,63 ; 24,61]
27	33,07 [18,21 ; 57,21]	28,1 [16,33 ; 45,62]	24,59 [14,83 ; 38,46]	22,05 [13,45 ; 34,1]	20,14 [12,39 ; 30,94]	18,44 [11,26 ; 28,89]	17,25 [10,45 ; 27,5]	15,25 [9,02 ; 25,35]
28	34,26 [18,84 ; 59,32]	28,98 [17,09 ; 46,77]	25,29 [15,46 ; 39,77]	22,66 [14,11 ; 35,16]	20,74 [12,93 ; 32,12]	19,09 [11,77 ; 29,58]	17,79 [10,9 ; 28,15]	15,67 [9,32 ; 25,92]
29	35,6 [19,89 ; 60,59]	29,93 [17,73 ; 48,52]	26,2 [15,97 ; 41,07]	23,46 [14,53 ; 36]	21,34 [13,39 ; 32,79]	19,82 [12,33 ; 30,64]	18,38 [11,27 ; 28,81]	16,19 [9,71 ; 26,61]
30	36,62 [20,46 ; 62,02]	30,9 [18,27 ; 50,22]	27 [16,68 ; 42,14]	24,37 [15,11 ; 36,93]	22,03 [13,92 ; 33,45]	20,37 [12,84 ; 31,45]	18,88 [11,79 ; 29,56]	16,73 [10,12 ; 27,25]



faible densité: [0 ; 5]
moyenne densité: [5 ; 10]
bonne densité: [10 ; 15]



très bonne densité: [15 ; 20]
densité excellente: ≥ 20

8. Le réglage de l'engin de pêche à l'électricité

La méthode VIGITRUIITE® produit des captures par unité d'effort, dont les résultats ont été étalonnés sur les densités réelles. Lors de l'utilisation du courant pulsé crénelé, il est important de respecter une fréquence basse, de l'ordre de 50 Hz. En effet, des tests d'efficacité avec des courants continus et pulsés crénelés sur les salmonidés (saumon atlantique et truite fario), réalisés pour une conductivité autour de $200 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, ont montré des résultats comparables mais des blessures plus nombreuses aux fréquences de 100 et 400 Hz (Pottier *et al.*, 2017). De plus, le rapport cyclique (*duty cycle*) doit être réglé autour de 25 %, pour éviter la baisse d'efficacité de capture et l'augmentation des blessures sur les poissons (Dolan and Miranda, 2004; Snyder, 2003, Miranda and Dolan, 2004). L'utilisation du courant pulsé de forme exponentielle est à proscrire du fait de son faible pouvoir attractif.

Réglage de la tension: la valeur de $0,1 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ correspond au seuil théorique moyen de gradient de tension dans l'eau qui induit le phénomène de taxie sur les poissons. Le procédé le plus fiable pour s'assurer d'un rayon d'attraction suffisant est de mesurer le gradient de tension autour de l'anode, grâce à une sonde Penny (nommée par W.G. Hartley car les extrémités étaient constituées de vieilles pièces de cuivre; Figure B). Connectée à un voltmètre, la sonde est placée à 150 cm de l'anode. La tension de l'engin de pêche à l'électricité est alors ajustée jusqu'à obtenir la valeur limite de $0,1 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$. Attention, l'espace entre les 2 capteurs de la sonde étant de 10 cm, la valeur lue sur le voltmètre doit être de 1 V. Actuellement, il n'existe pas de sonde Penny en vente, elle doit être construite.

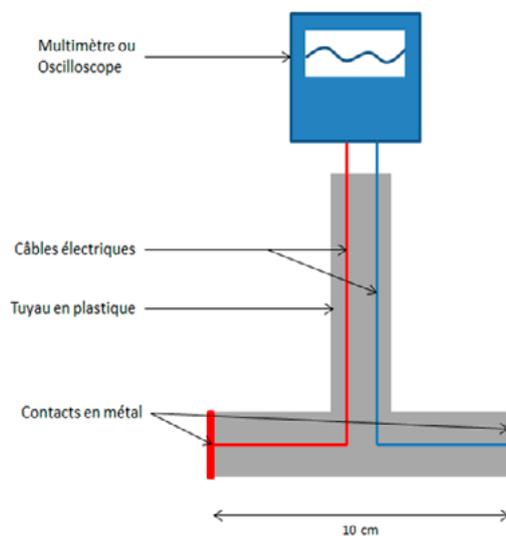


Figure B. Sonde Penny pour mesurer le gradient de tension.

9. Références

- Dolan, C.R., Miranda, L.E., 2004. Injury and mortality of warmwater fishes immobilized by electrofishing. *North Am. J. Fish. Manag.* 24, 118–127.
- Miranda, L.E., Dolan, C.R., 2004. Electrofishing Power Requirements in Relation to Duty Cycle. *North Am. J. Fish. Manag.* 24, 55–62. <https://doi.org/10.1577/M02-114>
- Pottier, G., Marchand, F., Azam, D., 2017. Comparaison de l'attractivité de différentes formes de courant et de leur impact sur les salmonidés (Saumon atlantique et Truite fario). Inra, 1036 (U3E), Pôle Gest'Aqua, Rennes, France.
- Pottier, G., Marchand, F., Azam, D., 2015. Test d'efficacité des dispositifs de pêche à l'électricité. Inra, 1036 (U3E), Pôle GEST'AQUA, F-35042, Rennes, France.
- Roussel J-M., Huteau D., Richard A., Gallet O (2004). Mise au point et validation d'une méthode simple pour estimer l'abondance des juvéniles de truite en cours d'eau. Rapport de fin de contrat, convention Inra/DIREN. 19 p.
- Servanty, S., Beaulaton, L., Roussel, J.M., 2016. VIGITRUIITE® : test de la méthode et construction de l'abaque entre la densité et l'indice d'abondance en juvéniles de truite 0+ et 1+. Rapport AFB-Inra Pole Gest'Aqua. 35 p.
- Snyder, D.E., 2003. Electrofishing and its harmful effects on fish (Information and Technology Report USGS/BRD/ITR-2003-0002). U.S. Geological Survey Biological Resources Division. U.S. Government Printing Office, Denver, CO.

Gaétan Pottier¹Thibault Vigneron²

Pêche toutes espèces

1. Objet et domaine d'application

Qu'elles soient complètes ou partielles, les pêches à l'électricité ont pour objectif d'obtenir un échantillon suffisamment représentatif des populations ou communautés présentes dans les stations prospectées. L'échantillonnage doit être reproductible dans le temps et dans l'espace pour pouvoir évaluer l'état du peuplement vis-à-vis d'un peuplement de référence et permettre une analyse comparative temporelle et spatiale.

2. Le choix de la station

Dans le cadre des réseaux de suivis, la finalité est d'acquérir des informations concernant l'état du milieu en analysant le peuplement piscicole. La station choisie est un résumé de l'échelle supérieure, le tronçon. La station doit donc être représentative du tronçon, c'est-à-dire qu'elle doit présenter une même proportion de faciès et un même niveau d'anthropisation. Il est recommandé que la limite amont de la station prospectée soit caractérisée par un obstacle naturel (un radier peu profond ou un seuil par exemple) ou par un filet barrage installé préalablement (vide de maille de 10 à 15 mm). La longueur de la station doit correspondre soit à une séquence de faciès d'écoulement (radier-mouille-plat), soit au tronçon compris entre deux méandres. Généralement, la longueur de la station prospectée correspond à environ 12 à 15 fois la largeur du lit mouillé. La norme NF EN 14011 (AFNOR, fnor, 2003) qui décrit les méthodes de pêche à l'électricité prescrit une longueur de la station d'au moins 20 fois la largeur de la rivière. Et pour les rivières dont la largeur est supérieure à 30 mètres, lorsque l'uniformité de la communauté de poissons est connue, une longueur de 10 fois la largeur est suffisante. Belliard *et al.* (2012) proposent des valeurs guides (Tableau A) pour pallier à un souci d'homogénéité de faciès et pour éviter des écarts importants autour des valeurs seuils.

Tableau A. Valeurs guides de la longueur minimale d'une station à prospecter en fonction de la largeur du lit mouillé (Belliard *et al.*, 2012)

Largeur du lit mouillé	Longueur minimale du point de prélèvement
< 3 m	60 m
De 3 m à 30 m	20 fois la largeur
De 30 m à 60 m	600 m
> 60 m	10 fois la largeur

3. Matériel requis

La quantité de matériel dépendra de la largeur du cours d'eau à prospecter :

- un engin de type non portatif avec un générateur + redresseur (pour une ou plusieurs anodes); un engin portatif avec une anode est permis uniquement dans des conditions spécifiques (profondeur inférieure à 30 cm, eau claire et faible largeur). Le nombre d'anodes à utiliser est ajusté en fonction des caractéristiques du cours d'eau prospecté. Il est recommandé d'utiliser au moins une anode pour 5 mètres de largeur du cours d'eau;
- des épauillettes semi circulaires de 35-60 cm de diamètre avec des vides de maille inférieurs ou égal à 5 mm;
- des seaux (profondeur ~ 40 cm et diamètre ~ 30 cm), ou dans le cas de capture d'anguilles, des bassines plus grandes.

¹ HYDRECO, F-97388 Kourou, France

² OFB, Service Connaissance, Direction régionale Bretagne, 84 rue de Rennes, F-35510 Cesson Sévigné, France

4. Moyens humains

La récolte des données sur le terrain nécessite une équipe de 3-4 personnes au minimum avec un engin portatif ou 5 avec un engin non portatif :

- un opérateur en charge de l'anode (+1 personne pour l'homme mort lors de l'utilisation d'engin portatif);
- une ou 2 personnes qui utilisent chacune une épuisette;
- une personne qui collecte les poissons capturés dans le seau;
- le nombre de personnes augmente selon la largeur du cours d'eau et la biométrie à effectuer sur les individus.

Rappel: il faut compter 1 anode pour 5 mètres de largeur au maximum. Pour une largeur entre 5 et 10 mètres, il faudra 2 anodes. Au-delà de 10 mètres de la largeur ou une profondeur supérieure à 70 cm, la pêche sera partielle.

5. Méthode complète

Objet et domaine d'application

La notion de pêche complète est utilisée lorsque la totalité (au moins 95 %) des points de prélèvement est prospectée à pied. La mise en œuvre d'une pêche toutes espèces permet d'acquérir des données sur la composition et la structure du peuplement piscicole d'une station donnée. Cette méthode nécessite au minimum 1 passage de capture dans le cas du standard de la directive cadre européenne ou pour le calcul de l'indice poisson rivière. Dans le cas d'estimation de l'effectif de la population, il est nécessaire d'effectuer au minimum 2 passages et il est parfois nécessaire d'en réaliser 3 voire 4 afin d'obtenir une bonne estimation de l'effectif de la population selon les espèces ciblées. Par exemple 2 passages suffisent généralement pour la truite fario et il faut compter de 4 à 7 passages pour les petites espèces benthiques. Dans le cadre des réseaux de suivi, un seul passage est considéré comme un effort suffisant pour apprécier les principales caractéristiques des peuplements nécessaires à l'évaluation de la qualité du milieu.

Protocole

Ces pêches sont réalisées en 1 (pour les réseaux) ou 2 passages successifs (ou 3 en cas de faible efficacité de pêche) sans remise à l'eau des poissons. Les passages successifs permettent d'appliquer les méthodes d'estimation de De Lury (1951) et de Carle et Strub (1978).

1. Les opérateurs, la technique et l'effort de pêche doivent être identiques lors des différents passages d'un même secteur.
2. Le(s) porteur(s) d'anode progresse(nt) de l'aval vers l'amont encadré(s) de 2 porteurs d'épuisettes qui se relaient pour capturer les poissons attirés par l'anode.
3. Tous les types d'habitats et de substrats sont prospectés, l'objectif étant de capturer la plus grande part du peuplement en place. Toutes les espèces de poissons et d'écrevisses sont capturées.
4. Pour la prospection de zones difficiles (parties profondes, embâcles, abris sous berge, etc.) il est recommandé de couper le circuit électrique et de le réamorcer pour surprendre les poissons qui auraient pu rester dans leurs caches.
5. Au niveau des sites où les lamproies sont très abondantes et dans la mesure où des indices d'abondances lamproies sont réalisés par ailleurs, elles ne sont échantillonnées que pour avoir la distribution des tailles et déterminer la présence ou l'absence des différentes espèces. Les densités ne sont pas évaluées car l'efficacité sur la lamproie est relativement faible, surtout si un seul passage est appliqué.

6. Méthodes partielles

Objet et domaine d'application

Lorsque les cours d'eau sont trop larges (plus de 9 mètres de largeur en moyenne) ou que la profondeur est trop excessive (> 70 cm) pour permettre une pêche à l'électricité efficace pour une prospection complète, l'alternative est de réaliser un sondage. À partir d'une prospection partielle, le but est d'obtenir un échantillon d'individus le plus représentatif possible du peuplement normalement capturable grâce à la pêche à l'électricité, de la station prospectée, que ce soit en termes de composition, de structure et d'abondance.

Protocole

Le choix du type de prospection (Figure A)

Selon la configuration de la station à prospector, trois types de prospection sont envisageables :

- une pêche à pied lorsque toutes les zones à pêcher sont guéables ou lorsque l'utilisation d'un bateau est impossible;
- une pêche en bateau lorsque toutes les zones à prospector sont accessibles en bateau;
- une pêche mixte associant des points de pêche effectués à pied et d'autres en bateau. Ce mode intervient notamment lorsque le cours d'eau associe des zones peu profondes (par exemple des radiers) et profondes (par exemple des mouilles).

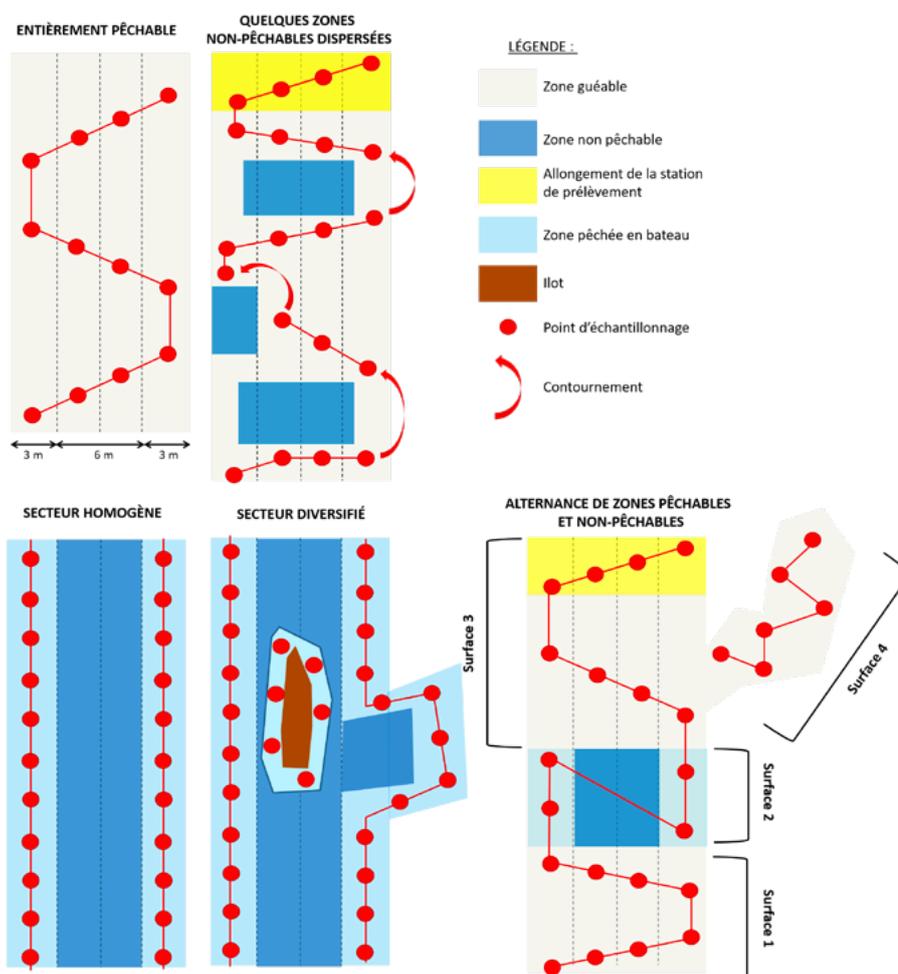


Figure A. Exemples de prospections : à pied entièrement pêchable ; à pied avec quelques zones non pêchables dispersées ; en bateau sur un secteur homogène ; en bateau sur un secteur diversifié ; mixte avec une alternance de zones pêchables et non pêchables. D'après Belliard et al., 2012.

Les points d'échantillonnage

L'unité d'échantillonnage est le point. Il correspond au déplacement de l'anode sur un cercle d'environ 1 mètre de diamètre (Belliard et al., 2012; Tomanova et al., 2013). Ce cercle s'effectue autour du point d'impact de l'anode dans l'eau sans le déplacement de l'opérateur. En pratique, il est parfois impossible d'effectuer des cercles parfaits comme sur les pêches en bateau. L'opérateur doit alors adapter son mouvement d'anode tout en veillant à conserver un même geste et donc des unités d'échantillonnage de taille standard.

Le rayon d'attraction efficace autour de l'anode correspond à la zone où le gradient de tension est supérieur ou égal à $0,1 \text{ V.cm}^{-1}$ (Snyder, 2003a). Ce rayon efficace a en moyenne été estimé à 1,5 m du centre de l'anode, ce qui correspond à une surface échantillonnée de $12,5 \text{ m}^2$ (Ditche, 2006 dans Belliard et al., 2012).

Le temps de pêche par points est compris entre 15 et 30 secondes. Si certains poissons se retrouvent bloqués dans des obstacles (branchages, abris sous berge, herbiers, etc.), ou lorsqu'aucun individu n'a été attrapé après la durée minimum, il est particulièrement recommandé de sortir l'anode de l'eau et de la remettre dedans pour renforcer l'électrotaxie du poisson, surtout de ceux atteints par l'électronarcose.

L'effort d'échantillonnage

Tomanova et al. (2013) ont étudié la stabilisation des caractéristiques du peuplement (particulièrement la richesse spécifique) en fonction de l'augmentation de l'effort d'échantillonnage (nombre de points prospectés) sur des moyens et grands cours d'eau. Leur étude a révélé que l'échantillon atteint généralement un « plateau de richesse spécifique » lorsqu'il est composé de :

- 75 points d'échantillonnage pour les cours d'eau dont la largeur est supérieure à 9 mètres et inférieure ou égale à 50 mètres ($9\text{ m} < \text{largeur} \leq 50\text{ m}$) ;
- 100 points d'échantillonnage lorsque la largeur du cours d'eau est supérieure à 50 mètres ($\text{largeur} \geq 50\text{ m}$).

De 0 à 10 points complémentaires peuvent être ajoutés pour compléter l'échantillon lorsque la station comporte des habitats singuliers.

Pour les pêches en bateau, l'utilisation d'une épuisette est un minimum. Pour les pêches à pied ou lorsque les cours d'eau présentent de fortes densités de poissons, l'utilisation d'une seconde épuisette est recommandée.

Plan d'échantillonnage

Dans les grands milieux profonds, le chenal où la pêche est considérée comme inefficace est exclus du plan d'échantillonnage. L'échantillonnage repose sur une prospection systématique de points répartis de façon régulière sur la station au sein de zones préalablement identifiées comme pêchables. Il est important que les points d'échantillonnage soient faits systématiquement. Il convient de ne pas effectuer automatiquement des points d'échantillonnage sur des habitats ponctuels singuliers peu représentatifs (habitats attractifs tels que les embâcles, les rejets, les herbiers, etc.). Les points complémentaires serviront à les prospecter en cas de besoin.

Le cheminement est différent selon le type de prospection (à pied, en bateau ou mixte), mais le principe reste le même. Le point de départ est situé dans la zone pêchable, au niveau le plus en aval possible de la station, au niveau d'une des deux rives (choisie aléatoirement en l'absence de contraintes pratiques). Les opérateurs se déplacent ensuite en zigzag et positionnent des points de pêche régulièrement espacés. La distance entre les points d'échantillonnage est liée à deux contraintes. La première est la nécessité de respecter une distance minimale entre deux points pour limiter la perturbation du point suivant par d'éventuelles fuites de poissons. La seconde est l'obligation de prospecter l'ensemble des zones pêchables de la station de manière systématique. La distance minimale entre deux points d'échantillonnage est d'environ 4 mètres lors de pêche à pied et d'environ 10 mètres en bateau. Il faut néanmoins veiller à ce que cette distance soit compatible avec la longueur du point d'échantillonnage. La zone prospectable est découpée longitudinalement en bandes virtuelles de 3 m, de telle sorte que lors du passage au point suivant l'opérateur se déplace latéralement de 3 m et longitudinalement d'une distance égale à la longueur de la zone/nombre de points (Figure A). La prospection est légèrement différente selon le mode de prospection adopté (Figure A). Les points d'échantillonnage s'enchaînent jusqu'à atteindre le nombre de points requis.

Dans le cas d'une pêche mixte (Figure A) il est nécessaire d'effectuer préalablement à la pêche un plan d'échantillonnage et une allocation des points proportionnelle à la représentation surfacique des faciès d'écoulement. Dans les zones profondes, seule une bande riveraine de 3 m considérée comme pêchable est prise en compte dans le calcul de proportionnalité.

Le nombre de points effectué est donc proportionnel à la surface respective de chaque zone (à pied ou en bateau).

$$Nb\ de\ points\ i = Nb\ de\ points\ total \times \frac{Surface_i}{Surface_{total}}$$

Au sein de chaque zone le nombre de points affecté est ensuite réparti selon les principes suivants :

- pour les bandes riveraines de 3 m, la répartition systématique est faite en fonction de la longueur. La distance entre deux points est donc égale à la longueur de la zone divisée par le nombre de points, tout en respectant un minimum de 4 mètres de séparation ;
- pour les zones prospectables à pied, les unités sont réparties en zigzag selon le même principe initial.

Méthodes d'estimation de la population de poissons

1. Capture marquage recapture

Le protocole

Cette méthode fait intervenir le marquage des poissons. Ce procédé permet d'identifier les individus de la première capture lors de la deuxième. L'identification peut être à l'échelle de l'individu ou de la population. Le marquage est utilisé pour connaître les effectifs, les déplacements, les croissances et/ou les mortalités.

Le principe est de marquer un lot d'individus. Ce lot doit être un échantillon représentatif de la population à estimer. Cet échantillon est considéré comme représentatif s'il est constitué d'individus qui ont la même probabilité d'être capturés (Krebs, 2014).

Le marquage ne doit pas modifier la mortalité ni le comportement des individus. Lorsque les animaux sont relâchés après le marquage, il faut bien les répartir dans le biotope pour éviter les agrégations. Il faut tout mettre en œuvre pour que les animaux marqués se réintègrent au mieux dans la population d'origine parmi les congénères non marqués.

La notation des variables utilisées est la suivante :

- N = estimateur effectif total inconnu de la population ;
- M = effectif des animaux marqués à la suite de la première pêche ;
- n = effectif des animaux capturés lors de la seconde pêche ;
- m = effectif des animaux marqués retrouvés dans la seconde pêche.

L'indice de Lincoln Petersen

Cet indice utilise les résultats concernant deux sessions de capture. Lors de la première pêche, M poissons sont capturés puis marqués. Ces M poissons sont relâchés, ils se redistribuent au hasard dans la population d'origine. La proportion des individus marqués par rapport aux non marqués est donc de :

$$\frac{M}{N}$$

Lors de la seconde pêche, l'effectif des poissons capturés a la valeur de n . Parmi eux se trouvent des individus marqués lors de la première pêche au nombre de m . La proportion des individus marqués par rapport aux non marqués est donc de :

$$\frac{m}{n}$$

Le fait d'admettre que la deuxième pêche est un échantillon représentatif de la population actuelle, notamment en ce qui concerne les proportions des individus marqués par rapport aux non marqués, le modèle de Lincoln-Petersen établit l'égalité suivante :

$$\frac{m}{n} = \frac{M}{N}$$

ce qui donne :

$$N = \frac{nM}{m}$$

Lorsque la taille de l'échantillon est petite, l'estimateur de l'effectif est biaisé et tend à surestimer l'effectif. Par exemple, lorsque le nombre de recapture est de 0. Une version modifiée avec moins de biais a été recommandée par Seber (Seber, 1982 dans Krebs, 2014) :

$$N = \frac{(M+1)(n+1)}{m+1} - 1$$

La variance de N est :

$$\sigma^2 = \frac{(M+1)(n+1)(M-m)(n-m)}{(m+1)^2(m+2)}$$

L'intervalle de confiance de 95 % (la normalité de N est assumée) est :

$$N \pm 1,965 \times \sqrt{\sigma^2}$$

La méthode de Schnabel ajustée par Chapman

La méthode de Schnabel étend l'indice de Lincoln-Petersen à plus de deux séries de capture (Krebs, 2014). Les conditions d'application de cette méthode sont les mêmes que celles requises pour l'indice de Lincoln-Petersen.

La notation des variables utilisées est la suivante :

- Nt = effectif de la population ;
- Ci = effectif du ie échantillon ;
- mi = nombre d'individus marqués juste avant la ie session ;
- R = nombre total d'individus marqués recapturés au bout des n sessions successives.

Cela donne :

$$Nt = \sum_i^n \left(\frac{Ci \times mi}{R+1} \right)$$

et

$$\sigma^2 = \frac{R}{[\sum_i^n (Ci \times mi)]^2}$$

2. Les captures par pêches successives avec retrait des individus : De Lury et Carle & Strub

La notation des variables utilisées dans les calculs de De Lury et Carle & Strub

- No = taille de la population étudiée ;
- Ci = nombre de poissons capturés à la pêche i ;
- Ni = nombre total de poissons capturés avant la pêche i, c'est-à-dire l'effectif cumulé des pêches i-1 ;
- T = nombre total de poissons capturés pour toutes les pêches ;
- k = nombre de pêches ;
- p = probabilité de capture d'un poisson durant une pêche ;
- q = 1 - p.

Méthode de De Lury

La méthode de De Lury (1951) s'applique principalement en rivière lorsque l'efficacité de l'engin de pêche est approximativement constante. La méthode est présentée à l'aide d'un exemple de deux prélèvements successifs sans remise.

La méthode utilisée estime l'effectif de la population en place sur la station en assimilant la diminution du nombre de captures entre chaque passage à des régressions log-linéaires. L'estimation de l'effectif total correspond à l'intersection entre la courbe des captures instantanées et l'axe des abscisses lorsque plus aucune capture ne peut être réalisée, soit $y = 0$ (Figure B).

Pour une espèce considérée, nous posons :

- C1 = nombre de poissons capturés lors du premier passage ;
- C2 = nombre de poissons capturés lors du deuxième passage ;
- Il faut impérativement que $C1 > C2$; dans le cas contraire la densité la plus probable ne peut être calculée.

Les étapes de calcul sont les suivantes :

- si $C1 > C2$, calculer R^2 :

$$R^2 = \frac{C1^2 \times (C1 - C2)^2}{C2^2 \times (C1 + C2)}$$

- si $R^2 < 16$ alors le nombre d'individus ne peut pas être estimé de façon précise avec un intervalle de confiance correct sur le plan statistique. Le nombre d'individus sera de l'ordre de $C1 + C2$;
- si $R^2 > 16$ alors le nombre total d'individus peut être estimé de façon précise avec un intervalle de confiance de 95 %. Le nombre total T est calculé selon la formule :

$$T = \frac{C1^2}{C1 + C2}$$

- la variance de T est donnée par la formule :

$$\sigma^2 = \frac{(C1^2 \times C2^2) \times (C1 + C2)}{(C1 - C2)^4}$$

- l'intervalle de confiance est :

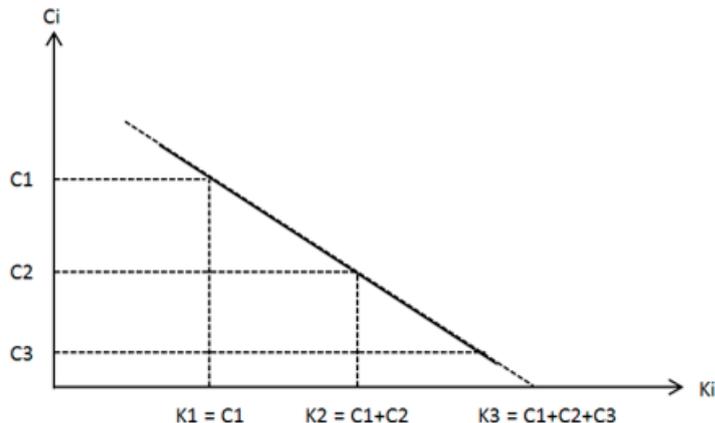
$$T - 1,965 \sqrt{\sigma^2} < T < T + 1,965 \sqrt{\sigma^2}$$

- il peut arriver que :

$$T - 2\sqrt{\sigma^2}$$

soit inférieur à $C1 + C2$, la limite inférieure de l'intervalle sera alors $C1 + C2$.

Figure B. Représentation graphique de la méthode de De Lury.
 C_i : nombre de captures au i^{e} passage
 K_i : nombre de captures cumulées au i^{e} passage



Méthode de Carle & Strub

Cette méthode permet de fournir des intervalles de confiances plus précis que celui qui est calculé avec les méthodes de Leslie, de De Lury et de Zippin (Gerdeaux, 1987). Lorsque les probabilités de capture sont faibles, il s'agit de la seule méthode capable de fonctionner. Par exemple, lorsque la probabilité de capture est croissante comme dans la revue de Carle and Strub (1978) où ils citent le cas d'effectifs de captures successifs de $C1 = 5$; $C2 = 7$ et $C3 = 8$ pour le chabot tacheté (*Cottus bairdii*). La méthode Carle & Strub fournit une estimation de l'effectif de 44 individus, ce qui donne une probabilité de capture de 0,174. Cependant pour que les résultats soient fiables, avec un biais de l'estimateur de Carle & Strub toujours négatif et ne dépassant pas la valeur de -5, il faut que la probabilité de pêche p soit supérieure à 0,3.

La méthode de Carle & Strub pondère la probabilité de capture p par deux paramètres α et β d'une distribution Béta. Avec cette méthode, N_0 est le plus petit entier supérieur ou égal à T qui satisfait l'inégalité suivante :

$$N - \frac{N + 1}{T + 1} \prod_i \frac{kN - X - T + \beta + (k - i)}{kN - X + \alpha + \beta + (k - i)} \leq 1$$

Avec $X = \sum (k - i)C_i$ et α et β paramètres de la loi Béta.

La probabilité de capture est estimée par maximum de vraisemblance :

$$p = \frac{T}{kN - X}$$

Ces calculs sont rapidement effectués à l'aide de programmes sur ordinateur.

N.B. Dans l'outil de saisie ASPE utilisé par les agents de l'OFB, les calculs ne sont effectués uniquement que lorsque l'efficacité est supérieure à 30 %. Lorsque l'efficacité est inférieure à 30 %, l'estimateur du nombre d'individus par défaut de calcul dans ASPE est C1+C2.

3. Choix du courant

Lorsqu'il est possible, préférez le courant continu (DC) pour attirer les poissons car il est plus efficace pour faire venir les individus provenant des abris en sous berge. En effet il induit une nage forcée contrairement au courant pulsé de forme crénelée. Si ce n'est pas possible, utilisez du courant pulsé crénelé (PDC), et non du courant pulsé de forme exponentielle (PEC), car son pouvoir attractif est trop faible. Lors de l'utilisation du PDC, si possible ne pas utiliser de fortes fréquences car plus elles augmentent, plus le pourcentage de poissons impactés augmente. Une fréquence autour de 40 Hz semble être un bon compromis. Concernant le rapport cyclique, réglez-le si possible autour de 25 %. Vous pouvez mesurer le rayon d'attraction (distance du gradient de tension de 0,1 V.cm⁻¹) en utilisant une sonde Penny reliée à un voltmètre.

Pour plus de conseils: frederic.marchand@inrae.fr.

4. Références bibliographiques

AFNOR, 2003. Norme NF EN 14011. Qualité de l'eau. Échantillonnage des poissons à l'électricité.

Belliard, J., Ditche, J.M., Roset, N., Dembski, S., 2012. Guide pratique de mise en œuvre des opérations de pêche à l'électricité.

Carle, F.L., Strub, M.R., 1978. A new method for estimating population size from removal data. *Biometrics* 34, 621–630.

De Lury, D.B., 1951. On the planning of experiments for estimation of fish populations. *J. Fish. Res. Board Can.* 8, 281–307.

Gerdeaux, D., 1987. Revue des méthodes d'estimation de l'effectif d'une population par pêches successives avec retrait. Programme d'estimation d'effectif par la méthode de Carle et Sturb. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 13–21. doi:10.1051/kmae:1987011

Krebs, C.J., 2014. Chapter 2: Estimating Abundance and Density: Mark-Recapture Techniques, in: *Ecological Methodology*. 3rd Ed (in Prep). pp. 23–89.

Snyder, D.E., 2003. Electrofishing and its harmful effects on fish (Information and Technology Report USGS/BRD/ITR-2003-0002). U.S. Geological Survey Biological Resources Division. U.S. Government Printing Office, Denver, CO.

Tomanova, S., Tedesco, P.A., Roset, N., Berrebi dit Thomas, R., Belliard, J., 2013. Systematic point sampling of fish communities in medium- and large-sized rivers: sampling procedure and effort. *Fish. Manag. Ecol.* 20, 533–543.

E Glossaire, références et annexes



© Michel Monsay - OFB

11 Glossaire	112
12 Références	114
13 Annexes	121



11 Glossaire

11.1 Termes généraux

Électrocution du poisson: mort d'un poisson, causée par l'action du courant électrique.

Électro/Galvano-taxie: nage involontaire du poisson en direction de l'anode causée par l'action de l'électricité sur le système nerveux.

Pêche à l'électricité: utilisation de champs électriques et de moyens mécaniques (par exemple épuisette) pour capturer des poissons.

Zone efficace/d'attraction: aire autour de l'anode dont le champ électrique est suffisamment fort pour induire une taxie sur un poisson.

11.2 Termes électriques

Champ homogène: champ électrique dans lequel le gradient de tension et la densité de courant sont uniformes.

Champ hétérogène: champ électrique dans lequel le gradient de tension et la densité de courant ne sont pas uniformes.

Conductivité: aptitude d'un matériau ou d'une solution conductrice à laisser passer un courant électrique.

Conductivité ambiante: mesures de conductivité qui sont ramenées pour une température donnée.

Conductivité d'immersion: valeur de la conductivité ambiante à laquelle il y a un maximum de transfert de puissance dans une matière totalement immergée dans un champ électrique homogène.

Conductivité efficace: valeur de la conductivité ambiante où le minimum de puissance est requis pour induire une réaction sur un poisson. Cela se manifeste lorsque le maximum de transfert de puissance apparaît et diminue à des valeurs inférieures et supérieures.

Conductivité spécifique: mesures de conductivité qui sont ramenées à une température spécifique de référence, le plus souvent de 20°C ou de 25°C.

Courant alternatif: courant qui change de sens deux fois par période. Il existe le courant alternatif multiphasé. Il est constitué de plusieurs courants alternatifs de même fréquence et même amplitude qui sont déphasés dans le temps. Il prend couramment une forme sinusoïdale.

Courant continu lisse (DC): courant électrique dont la tension est indépendante du temps (constante).

Courant continu ondulé (DC): forme de courant qui se rapproche le plus du courant continu lisse mais qui conserve un certain taux d'ondulation.

Courant pulsé: courant prenant la forme d'impulsions discrètes et uniformes.

Courant pulsé crénelé ou courant continu pulsé (PDC): courant pulsé dont les impulsions ont la forme rectangulaire.

Courant pulsé exponentiel (PEC): courant pulsé dont les impulsions résultent d'une décharge de condensateur.

Courant pulsé demi de sinusoïde: courant pulsé issu d'un redressement du courant alternatif.

Courant pulsé quart de sinusoïde: courant pulsé issu d'un redressement et d'un filtrage du courant alternatif.

Densité de courant (J): elle correspond au champ de vecteurs qui associe un vecteur de densité de courant à tout point de ce champ. Elle est exprimée en $A.cm^{-2}$.

Densité de puissance (D): elle correspond à la quantité de puissance dissipée par unité de volume entre deux surfaces isopotentielles. Elle est exprimée en $\mu W.cm^{-3}$.

Durée de l'impulsion: elle dépend de la forme de l'impulsion:

- crnelée: durée du flux de courant;
- exponentielle: période entre V_{max} et V/e , avec e la base du logarithme népérien;
- sinusoïdale: période durant laquelle la tension dépasse 10 % de la V_{max} .

Fréquence: nombre de fois qu'un motif est répété par unité de temps. Son unité est l'Hertz représentant le nombre de motif par seconde.

Gradient de tension (E): moyenne des différences de tension par unité de distance entre deux points situés à des distances différentes d'une électrode. Il est exprimé en $V.cm^{-1}$.

Lignes de courant: lignes perpendiculaires aux lignes équipotentielles, qui indiquent la direction instantanée du courant électrique.

Lignes équipotentielles: lignes qui joignent les points d'un champ électrique où le gradient de tension est le même.

Motif du courant: la plus petite portion du courant qui se répète au cours du temps.

Motif du champ: distribution de la tension et de l'intensité dans un champ électrique.

Période du motif: durée du motif du courant.

Pic de tension (V_{pk}): magnitude entre la valeur maximale de la tension et zéro.

Rapport cyclique: pourcentage de temps dans un motif du courant électrique où le courant circule.

Résistivité: aptitude d'une matière conductrice à s'opposer au passage d'un courant électrique sous une tension électrique donnée.

Tension moyenne: moyenne arithmétique de la tension. Il s'agit d'une tension différente de la tension RMS.

Tension RMS (Root Mean Square): tension qui quantifie l'équivalent de la tension qu'il y aurait pour une même puissance utilisée lors de l'application de courant continu.

Théorie du transfert de puissance: théorie qui établit que les réactions d'un poisson sont liées à la puissance transférée dans l'animal, et qu'elle dépend du rapport de la conductivité du poisson et de celle de l'eau.

Termes liés à l'équipement

Anode: électrode positive du générateur.

Boîte de contrôle: boîte qui effectue la liaison électrique entre le générateur et les électrodes. C'est dans cette boîte qu'a lieu la transformation de la forme du courant.

Cathode: électrode négative du générateur.

Configuration d'un engin de pêche à l'électricité: la tension réglée, l'intensité de sortie, la puissance fournie, les câbles et les électrodes utilisés pour capturer les poissons.

Électrodes pendantes: tubes ou tiges sous suspendus à une base, comme les électrodes en forme d'anneau du Wisconsin.

Électrode en forme d'anneau: une électrode fabriquée à partir d'un cercle en anneau.

Électrode en forme de sphère: une électrode fabriquée à partir d'une sphère en métal.

Électrode en forme d'anneau du Wisconsin: une électrode formée à partir d'une base circulaire d'où part une série d'électrodes pendantes dans le but d'avoir des caractéristiques électriques d'une électrode du même diamètre que celui formé par cette série d'électrodes pendantes.

Ensemble d'électrodes: un motif d'électrodes qui sont arrangées d'une certaine manière pour produire un champ électrique défini dans l'eau.

Générateur: dispositif permettant de produire de l'énergie électrique.

Interrupteur/bouton d'arrêt d'urgence: interrupteur qui permet de couper le courant électrique au niveau des électrodes ou de la boîte de contrôle.

Interrupteur homme-mort: interrupteur qui se situe généralement sur le manche porte-anode. Lorsque le pouce appuie dessus, l'électrode est alimentée en électricité. Par contre ce système permet de couper rapidement le circuit en levant le pouce. Cet interrupteur peut être déporté, une autre personne assure donc la sécurité des opérateurs.



12 Références

ACHLEITNER D., GASSNER H., LUGER M. (2012) – Comparison of three standardised fish sampling methods in 14 alpine lakes in Austria: comparison of fish sampling methods for lakes, *Fisheries Management and Ecology*, 19, 4, p.p. 352-361.

Afnor (2012) – Norme CEI 60335-2-86 COMPIL: Appareils électrodomestiques et analogues - Sécurité - Partie 2-86 : règles particulières pour les équipements électriques de pêche - Compilation de la publication CEI 60335-2-86 de mars 2002 de son amendement 1 d'avril 2005 et de son amendement 2 d'octobre 2012.

Afnor (2003) – Norme NF EN 14011 : Qualité de l'eau. Échantillonnage des poissons à l'électricité.

Afnor (2006a) – Norme NF EN 14962 : Qualité de l'eau - Guide sur le domaine d'application et la sélection des méthodes d'échantillonnage de poissons.

Afnor (1992) – Norme NF EN 50081-1 : Compatibilité électromagnétique - Norme générique émission - Partie 1 : résidentiel, commercial et industrie légère.

Afnor (1998) – Norme NF EN 50082-1 : Compatibilité électromagnétique - Norme générique immunité - Partie 1 : résidentiel, commercial et industrie légère.

Afnor (2006b) – Norme NF EN 60204-1 : Sécurité des machines - Équipement électrique des machines - Partie 1 : règles générales.

Afnor (2000) – Norme NF EN 60439-1. Sécurité des machines - Équipement électrique des machines - Partie 1 : règles générales.

Afnor (2008) – Norme XP T90-383 : Qualité de l'eau - Échantillonnage des poissons à l'électricité dans le cadre des réseaux de suivi des peuplements de poissons en lien avec la qualité des cours d'eau.

AINSLIE B.J., POST J.R., PAUL A.J. (1998) – Effects of Pulsed and Continuous DC Electrofishing on Juvenile Rainbow Trout, *North American Journal of Fisheries Management*, 18, 4, p.p. 905-918.

ALABASTER J.S., HARTLEY W.G. (1962) – The Efficiency of a Direct Current Electric Fishing Method in Trout Streams, *The Journal of Animal Ecology*, 31, 2, p.p. 385.

ALLARD L. *et al.* (2014) – Electrofishing efficiency in low conductivity neotropical streams: towards a non-destructive fish sampling method, *Fisheries Management and Ecology*, 21, 3, p.p. 234-243.

ALLISON L.N. (1960) – The Effect of Tricaine Methanesulfonate (M.S. 222) on the Motility of Brook Trout Sperm, Michigan Department of Natural Resources, (Fisheries Division Library).

ARNEKLEIV J.V. *et al.* (2004) – Recovery of wild, juvenile brown trout from stress of flow reduction, electrofishing, handling and transfer from river to an indoor simulated stream channel, *Journal of Fish Biology*, 64, 2, p.p. 541-552.

BARRETT J.C., GROSSMAN G.D. (1988) – Effects of Direct Current Electrofishing on the Mottled Sculpin, *North American Journal of Fisheries Management*, 8, 1, p.p. 112-116.

BARTON B.A., DWYER W.P. (1997) – Physiological stress effects of continuous-and pulsed-DC electroshock on juvenile bull trout, *Journal of Fish Biology*, 51, 5, p.p. 998-1008.

BEAUMONT W.R.C. (2011) – Electric fishing: a complete guide to theory and practice, Wareham, Game & Wildlife Conservation Trust, 2011, 98 p.

BEAUMONT W.R.C. (2016) – Electricity in fish research and management: theory and practice, Second edition, Hoboken, John Wiley & Sons Inc.

BEAUMONT W.R.C. *et al.* (2002) – Guidelines for Electric Fishing Best Practice, Environment Agency, Swindon.

- BEAUMONT W.R.C., LEE M.J., PEIRSON G. (2003) – An investigation of the Equivalent Resistance, Power Requirements and Field Characteristics of Electric Fishing Electrodes, R&D Technical Report W2-076/TR, p.p. 41 pages.
- BEAUMONT W.R.C., LEE M.J., PEIRSON G. (2005) – The equivalent resistance and power requirements of electric fishing electrodes, *Fisheries Management and Ecology*, 12, p.p. 37-43.
- BEAUMONT W.R.C., LEE M.J., ROUEN M.A. (2000) – An evaluation of some electrical waveforms and voltages used for electric fishing; with special reference to their use in backpack electric fishing gear, *Journal of Fish Biology*, 57, 2, p.p. 433-444.
- BEAUMONT W.R.C., PEIRSON G., LEE M.J. (2006) – Factors affecting the characteristics and propagation of voltage gradient fields from electric fishing anodes, *Fisheries Management and Ecology*, 13, p.p. 47-52.
- BELLIARD J. *et al.* (2012) – Guide pratique de mise en œuvre des opérations de pêche à l'électricité.
- BENEJAM L. *et al.* (2012) – Fish catchability and comparison of four electrofishing crews in Mediterranean streams, *Fisheries Research*, p.p. 9-15.
- BIRD D., COWX I. (1993) – The selection of suitable pulsed currents for electric fishing in waters, *Fisheries Research*, 18, 3-4, p.p. 363-376.
- BOHLIN T. *et al.* (1989) – Electrofishing—theory and practice with special emphasis on salmonids, *Hydrobiologia*, 173, 1, p.p. 9-43.
- BOHL R.J., HENRY T.B., STRANGE R.J. (2010) – Electroshock-induced mortality in freshwater fish embryos increases with embryo diameter: a model based on results from 10 species, *Journal of Fish Biology*, 76, 4, p.p. 975-986.
- BRETT J.R. (1944) – Some Lethal Temperature Relations of Algonquin Park Fishes, Toronto, The University of Toronto press, 1944, 49 p.
- CARLE F.L., STRUB M.R. (1978) – A new method for estimating population size from removal data, *Biometrics*, 34, p.p. 621-630.
- CHMIELEWSKI A. *et al.* (1973) – Investigation of a method for comparing the efficiency of electrical fishing machines, *Polskie Archiwum Hydrobiologii*, 20, p.p. 319-340.
- CHO G.K., HEATH J.W., HEATH D.D. (2002) – Electroshocking Influences Chinook Salmon Egg Survival and Juvenile Physiology and Immunology, *Transactions of the American Fisheries Society*, 131, 2, p.p. 224-233.
- COOKE S.J., BUNT C.M., MCKINLEY R.S. (1998) – Injury and short term mortality of benthic stream fishes—a comparison of collection techniques, *Hydrobiologia*, 379, p.p. 207-211.
- COOKE S.J., BUNT C.M., MCKINLEY R.S. (1998) – Injury and short term mortality of benthic stream fishes—a comparison of collection techniques, *Hydrobiologia*, 379, 1-3, p.p. 207-211.
- COWX I.G., LAMARQUE P. (1990) – Fishing with electricity. Applications in Freshwater Fisheries Management, Fishing News Books, Oxford, England, Blackwell Scientific Publications, 1990, 248 p.
- COWX I.G., WHEATLEY G.A., HICKLEY P. (1988) – Development of boom electric fishing equipment for use in large rivers and canals in the United Kingdom, *Aquaculture Research*, 19, 2, p.p. 205-212.
- CUCHEROUSSET J., BLANCHET S., SANTOUL F. (2014) – Évaluation de l'efficacité d'un bateau de pêche électrique pour les inventaires piscicoles en milieux lenticques.
- CUINAT R. (1968) – Contribution à l'étude de quelques paramètres physiques dans la pêche électrique en courant continu, en rivière, in *Applications de l'électricité à la biologie et à l'aménagement des pêches continentales*. Symposium de Belgrade, mai 1966., Paris, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. INRA, p.145-180.
- CUINAT R. (1965) – L'appareil de pêche électrique Electro-Pullman Moyen Coupable (EPMC), *Station d'Hydrobiologie Continentale de Biarritz*, p.p. 15 pages.
- DALBEY S.R., MCMAHON T.E., FREDENBERG W. (1996) – Effect of electrofishing pulse shape and electrofishing-induced spinal injury on long-term growth and survival of wild rainbow trout, *North American Journal of Fisheries Management*, 16, 3, p.p. 560-569.
- DALBEY S.R., MCMAHON T.E., FREDENBERG W. (1996) – Effect of electrofishing pulse shape and electrofishing-induced spinal injury on long term growth and survival of wild Rainbow trout, *North American Journal of Fisheries Management*, 16, p.p. 560-569.

- DE LURY D.B. (1951) – On the planning of experiments for estimation of fish populations, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 8, p.p. 281-307.
- DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ALIMENTATION (2015) – Ordre de méthode. Note de service DGAL/SDSPA/2015-843.
- DOLAN C.R., MIRANDA L.E. (2003) – Immobilization Thresholds of Electrofishing Relative to Fish Size, *Transactions of the American Fisheries Society*, 132, 5, p.p. 969-976.
- DOLAN C.R., MIRANDA L.E. (2004) – Injury and mortality of warmwater fishes immobilized by electrofishing, *North American Journal of Fisheries Management*, 24, p.p. 118-127.
- DOLAN C.R., MIRANDA L.E., HENRY T.B. (2002) – Electrofishing for Crappies: Electrical Settings Influence Immobilization Efficiency, Injury, and Mortality, *North American Journal of Fisheries Management*, 22, 4, p.p. 1442-1451.
- DWYER W.P., ERDAHL D.A. (1995) – Effects of Electroshock Voltage, Wave Form, and Pulse Rate on Survival of Cutthroat Trout Eggs, *North American Journal of Fisheries Management*, 15, 3, p.p. 647-650.
- DWYER W.P., SHEPARD B.B., WHITE R.G. (2001) – Effect of Backpack Electroshock on Westslope Cutthroat Trout Injury and Growth 110 and 250 Days Posttreatment, *North American Journal of Fisheries Management*, 21, 3, p.p. 646-650.
- EIFAC (2005) – EIFAC working Party on Fish Monitoring in Fresh Waters - DRAFT Information Note - Electric Fishing Best Practice, EIFAAC/CECPAI/CAEPCA.
- EMERY L. (1984) – The physiological effects of electrofishing, *CAL-NEVA Wildlife Transactions*, p.p. 59-72.
- GATZ A.J., ADAMS S.M. (1987) – Effects of Repeated Electroshocking on Growth of Bluegill X Green Sunfish Hybrids, *North American Journal of Fisheries Management*, 7, 3, p.p. 448-450.
- GATZ A.J., LOAR J.M., CADA C.F. (1986) – Effects of repeated electroshocking on instantaneous growth of trout, *North American Journal of Fisheries Management*, 6, p.p. 176-182.
- GOSSET C. (1975) – L'appareil de pêche à l'électricité pour eau douce et saumâtre : le « Cormoran », *La Pisciculture Française d'eau vive et d'étang*, 44, p.p. 37-42.
- GOSSET C. (1976) – Un appareil de pêche à courant continu à haute performance : le « Héron », *Pisciculture Française*, 47, p.p. 25-29.
- GOSSET C. *et al.* (1971) – Un nouvel appareil de pêche électrique portable : le « Martin-pêcheur », *BULLETIN FRANÇAIS DE PISCICULTURE*, 242, p.p. 34-46.
- GRISAK G.G. (1996) – Effects of two electrofishing treatments on eight warmwater fish species in Montana, Montana State University.
- GROWNS I.O., POLLARD D.A., HARRIS J.H. (1996) – A comparison of electric fishing and gillnetting to examine the effects of anthropogenic disturbance on riverine fish communities, *Fisheries Management and Ecology*, 3, 1, p.p. 13-24.
- HALSBAND E. (1968) – Principes fondamentaux de la pêche à l'électricité, in *Applications de l'électricité à la biologie et à l'aménagement des pêches continentales. Symposium de Belgrade, mai 1966., Paris, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. INRA*, p.79-85.
- HARMON T.S. (2009) – Methods for reducing stressors and maintaining water quality associated with live fish transport in tanks: a review of the basics, *Reviews in Aquaculture*, 1, 1, p.p. 58-66.
- HASNAIN S.S. *et al.* (2010) – Key ecological temperature metrics for Canadian freshwater fishes, Sault Ste. Marie, Ont., Applied Research and Development Branch, Ministry of Natural Resources.
- HAYES J.W., BAIRD D.B. (1994) – Estimating relative abundance of juvenile brown trout in rivers by underwater census and electrofishing, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 28, 3, p.p. 243-253.
- HENRY T.B. *et al.* (2004) – Susceptibility of Ten Fish Species to Electroshock-Induced Mortality, *Transactions of the American Fisheries Society*, 133, 3, p.p. 649-654.
- HENRY T.B., GRIZZLE J.M. (2006) – Electric-induced mortality of newly transformed juvenile fishes in waters of different conductivity, *Journal of Fish Biology*, 68, 3, p.p. 747-758.
- HENRY T.B., GRIZZLE J.M., MACEINA M.J. (2003) – Electroshocking-Induced Mortality of Four Fish Species during Posthatching Development, *Transactions of the American Fisheries Society*, 132, 2, p.p. 299-306.

- HOLLENDER B.A., CARLINE R.F. (1994) – Injury to wild brook trout by backpack electrofishing, *North American Journal of Fisheries Management*, 14, p.p. 643-649.
- HOLMES R. *et al.* (1990) – Electrofishing induced mortality and injury to rainbow trout, arctic grayling, humpback whitefish, least cisco, and northern pike, Fishery manuscript n° 90³. Alaska Department of Fish and Game Division of Sport Fish, Anchorage Alaska., p.p. 95 pages.
- KENNEDY G.J.A., STRANGE C.D. (1981) – Efficiency of electric fishing for salmonids in relation to river width, *Aquaculture Research*, 12, 2, p.p. 55–60.
- KOLZ A.L. (1989) – A power transfer theory for electrofishing. Electrofishing, a power related phenomenon, Washington, D.C., U.S.A., United States Department of the Interior Fish and Wildlife Service.
- KOLZ A.L. (2006) – Electrical Conductivity as Applied to Electrofishing, *Transactions of the American Fisheries Society*, 135, 2, p.p. 509-518.
- KOLZ A.L. (1993) – In-water electrical measurements for evaluating electrofishing systems, Fish and Wildlife Service Technical Report. United States Department of the Interior Fish and Wildlife Service, Washington, D.C., 11, p.p. 24 pages.
- KOLZ A.L., REYNOLDS J.B. (1989) – Determination of power threshold response curves, Fish and Wildlife Service Technical Report. United States Department of the Interior Fish and Wildlife Service, Washington, D.C., U.S.A, 22, p.p. 15-24.
- KYNARD B., LONSDALE E. (1975) – Experimental Study of Galvanonarcosis for Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*) Immobilization, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 32, 2, p.p. 300-302.
- LAMARQUE P. (1968) – Électrophysiologie du poisson soumis à l'action d'un champ électrique, in *Applications de l'électricité à la biologie et à l'aménagement des pêches continentales*. Symposium de Belgrade, mai 1966., Paris, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. INRA, p.87-110.
- LAMARQUE P. (1990a) – Electrophysiology of fish in electric field, , Cowx, I. ed. *Development in Electric Fishing*. Proceeding of an International Symposium on Fishing with Electricity, Hull, UK, 1998. Oxford: Fishing News Books Blackwell Scientific Publications.
- LAMARQUE P. (1990b) – Electrophysiology of fish in electric field, in *Fishing with electricity, applications in freshwater fisheries management*, Fishing News Books, Oxford, England, p.4-33.
- LAMARQUE P. (1990c) – Twenty years of electric fishing expeditions throughout the World, Cowx, I. ed. *Development in Electric Fishing*. Proceeding of an International Symposium on Fishing with Electricity, Hull, UK, 1998. Oxford: Fishing News Books Blackwell Scientific Publications.
- LAMARQUE P. (1976a) – Types de courant électrique à utiliser pour la capture optimale des anguilles, *Pisciculture Française*, 47, p.p. 30-37.
- LAMARQUE P. (1976b) – Types de courant électrique à utiliser pour la capture optimale des poissons principalement les anguilles, *Pisciculture Française*, 47, p.p. 30-37.
- LAMARQUE P. (1977) – Un appareil de pêche à l'électricité pour les eaux de forte conductivité (eaux saumâtres et marines), *Cybium* 3^e série, p.p. 75-94.
- LAMARQUE P., THEREZIEN Y., CHARLON N. (1975) – Étude des conditions de la pêche à l'électricité dans les eaux tropicales, *Bulletin du centre d'études et de recherches scientifiques*. Biarritz, 10, 4, p.p. 405-665.
- LAMBERT P., FEUNTEUN E., RIGAUD C. (1994) – Étude de l'anguille en marais d'eau douce. Première analyse des probabilités de capture observées lors des inventaires par pêche électrique, *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 335, p.p. 111-121.
- MACKERETH F.J.H., HERON J., TALLING J.F. (1978) – *Water Analysis*, Windemere : Freshwater Biological Association Scientific Publication, 1978, 120 p.
- MARCHAND F., SACRÉ B., AZAM D. (2013) – Dispositifs de pêche à l'électricité. Étude préliminaire sur les caractéristiques des différents matériels et des réglages possibles, *Rapport final ONEMA-INRA*, p.p. 25 pages.
- MARIOTT R.A. (1973) – Effects of electric shocking on fertility of mature pink salmon, *Progressive Fish-Culturist*, 35, p.p. 191-194.

- MCINERNEY M.C., CROSS T.K. (2004) – Comparison of Day Electrofishing, Night Electrofishing, and Trap Netting for Sampling in Shore Fish in Minnesota Lakes, Minnesota Department of Natural Resources, 2004 Consultable à <http://archive.leg.state.mn.us/docs/2005/other/050135.pdf> [Accédé le 25 août 2015].
- MCMICHAEL G.A. (1993) – Examination of Electrofishing Injury and Short-Term Mortality in Hatchery Rainbow Trout, *North American Journal of Fisheries Management*, 13, 2, p.p. 229-233.
- MEISMER S.M. (1999) – Effects of electrofishing fields on captive subadult colorado pikeminnow and adult rainbow trout, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- MESA M.G., SCHRECK C.B. (1989) – Electrofishing mark-recapture and depletion methodologies evoke behavioral and physiological changes in cutthroat trout, *Transactions of the American Fisheries Society*, 118, p.p. 644-658.
- MIRANDA L.E. (2009) – Standardizing electrofishing power for boat electrofishing: chapter 14, in *Standard methods for sampling North American freshwater fishes*, Bethesda, Maryland, Scott A. Bonar, Wayne A. Hubert, and David W. Willis, editors, p.223-230.
- MIRANDA L.E., DOLAN C.R. (2004) – Electrofishing Power Requirements in Relation to Duty Cycle, *North American Journal of Fisheries Management*, 24, 1, p.p. 55-62.
- MIRANDA L.E., DOLAN C.R. (2003) – Test of a Power Transfer Model for Standardized Electrofishing, *Transactions of the American Fisheries Society*, 132, 6, p.p. 1179-1185.
- MITTON C.J.A., MCDONALD D.G. (1994a) – Consequences of pulsed DC electrofishing and air exposure to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51, p.p. 1791-1798.
- MITTON C.J.A., MCDONALD D.G. (1994b) – Effects of electroshock, air exposure, and forced exercise on swim performance in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51, p.p. 1799-1803.
- MORROW J.V., FISCHENICH J.C. (2000) – Habitats requirements for freshwater fishes, Vicksburg, MS, U.S. Army Engineer Research and Development Center, (EMRRP Technical Notes Collection (ERDC TN-EMRRP-SR-06).
- MUNSCH C. (2012) – Etude des méthodes de décontamination du matériel et élaboration d'une procédure de gestion du risque. Rapport de Stage, ONEMA, Université de Strasbourg.
- MUTH R.T., RUPPERT J.B. (1997) – Effects of Electrofishing Fields on Captive Embryos and Larvae of Razorback Sucker, *North American Journal of Fisheries Management*, 17, 1, p.p. 160-166.
- MUTH R.T., RUPPERT J.B. (1996) – Effects of two electrofishing currents on captive ripe razorback suckers and subsequent egg-hatching success, *North American Journal of Fisheries Management*, 16, p.p. 473-476.
- NOVOTNY D.W., PRIEGEL G.R. (1974) – Electrofishing boats: Improved designs and operational guidelines to increase the effectiveness of boom shockers, Wisconsin Department of Natural Resources.
- PENCZAK T. *et al.* (1997) – The effect of artificial increases in water conductivity on the efficiency of electric fishing in tropical streams (Paraná, Brazil), *Hydrobiologia*, 350, p.p. 189-202.
- PENCZAK T. *et al.* (1998) – The importance of qualitative inventory sampling using electric fishing and nets in a large, tropical river (Brazil), *Hydrobiologia*, 389, 1-3, p.p. 89-100.
- PENCZAK T., AGOSTINHO A.A., LATINI J.D. (2003) – Rotenone calibration of fish density and biomass in a tropical stream sampled by two removal methods, *Hydrobiologia*, 510, 1-3, p.p. 23-38.
- PICKERING A.D. (1993) – Husbandry and stress, in *Recent Advances in Aquaculture*, Oxford, p.340.
- PICKERING A.D., POTTINGER T.G., CHRISTIE P. (1982) – Recovery of the brown trout, *Salmo trutta* L., from acute handling stress: a time-course study, *Journal of Fish Biology*, 20, 2, p.p. 229-244.
- POTTIER G. (2014) – Dispositifs de pêche à l'électricité. Les facteurs qui ont une influence sur l'efficacité de la pêche électrique., F-35042, Rennes, France, INRA, 1036 (U3E), Pôle GEST'AQUA.
- POTTIER G. *et al.* (2014) – Dispositifs de pêche à l'électricité. Modélisation de la dispersion du champ électrique dans l'eau lors de l'utilisation d'appareils de pêche électrique. Influence des configurations de pêche à l'électricité sur la dispersion du courant dans l'eau., France, INRA, 1036 (U3E), Pôle GEST'AQUA.
- POTTIER G. (2017) – Influence du substrat sur la propagation dans l'eau d'un champ électrique produit par un engin de pêche électrique, *Cahier des Techniques de l'INRA*, 91, Article 3, p.p. 7 pages.

- POTTIER G., MARCHAND F., AZAM D. (2017) – Comparaison de l'attractivité de différentes formes de courant et de leur impact sur les poissons, Rennes, France, INRA, 1036 (U3E), Pôle GEST'AQUA.
- POTTIER G., MARCHAND F., AZAM D. (2015) – Test d'efficacité des dispositifs de pêche à l'électricité, F-35042, Rennes, France, INRA, 1036 (U3E), Pôle GEST'AQUA.
- POTTIER G., MARCHAND F., AZAM D. (2016) – Test d'efficacité des dispositifs de pêche à l'électricité : focus sur l'anguille commune et toutes espèces., Rennes, INRA, 1036 (U3E), Pôle GEST'AQUA.
- POULET N., BEAULATON L., DEMBSKI S. (2011) – Time trends in fish populations in metropolitan France: insights from national monitoring data, *Journal of Fish Biology*, 79, 6, p.p. 1436-1452.
- PUSEY B.J. *et al.* (1998) – Quantitative sampling of stream fish assemblages: Single-vs multiple-pass electrofishing, *Australian Journal of Ecology*, 23, 4, p.p. 365–374.
- REYNOLDS J.B. (1983) – Electrofishing, in *Fisheries Techniques*, Blacksburg, Virginia, L. Nielsen & D.L. Johnson, p.147-163.
- REYNOLDS J.B. (2016) – Spheres, Rings, and Rods as Electrodes in Electrofishing: Their Effects on System Resistance and Electrical Fields, *Transactions of the American Fisheries Society*, 145, 2, p.p. 239-248.
- REYNOLDS J.B., KOLZ A.L. (2012) – Electrofishing, in *Fisheries Techniques*, 3rd Edition, Bethesda, Maryland, USA, p.305-361.
- ROACH S.M. (1999) – Influence of Electrofishing on the Mortality of Arctic Grayling Eggs, *North American Journal of Fisheries Management*, 19, 4, p.p. 923-929.
- ROSS L.G., ROSS B. (2008) – Anaesthetic and sedative techniques for aquatic animals, 3rd ed, Oxford ; Ames, Iowa, Blackwell, 2008, 222 p.
- RUSHTON W.A.H. (1927) – The effect upon the threshold for nervous excitation of the length of nerve exposed, and the angle between current and nerve, *The Journal of Physiology*, 63, 4, p.p. 357-377.
- SANDERS R.E. (1992) – Day versus night electrofishing catches from near-shore waters of the Ohio and Muskingum Rivers, *Ohio Journal of Science*, 92, p.p. 51-59.
- SCHEMINZKY F. (1934) – Über die Natur der „Wechselstromnarkose“ bei Fischen, *Pflügers Archiv für die Gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 233, 1, p.p. 371-379.
- SCHOLTEN M. (2003) – Efficiency of point abundance sampling by electro-fishing modified for short fishes, *Journal of Applied Ichthyology*, 19, 5, p.p. 265–277.
- SCHRECK C.B. *et al.* (1976) – Physiological Responses of Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*) to Electroshock, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 33, 1, p.p. 76-84.
- SCRUTON D.A., GIBSON R.J. (1995) – Quantitative electrofishing in Newfoundland and Labrador : result of workshops to review current methods and recommend standardization of techniques, Saint John's, NF, Canada.
- SHARBER N.G. *et al.* (1994) – Reducing Electrofishing-induced injury of Rainbow trout, *North American Journal of Fisheries Management*, 14, p.p. 340-346.
- SHARBER N.G., BLACK J.S. (1999) – Epilepsy as a unifying principle in electrofishing theory: a proposal, *Transactions of the American Fisheries Society*, 128, p.p. 666-671.
- SHARBER N.G., CAROTHERS S.W. (1988) – Influence of electrofishing pulse shape on spinal injuries in adult rainbow trout, *North American Journal of Fisheries Management*, 8, p.p. 117-122.
- SIEPKER M.J. *et al.* (2006) – Evidence of Reduced Reproductive Success of Nesting Largemouth Bass Sampled with Standard Electrofishing Procedures, *North American Journal of Fisheries Management*, 26, 3, p.p. 631-635.
- SNYDER D.E. (2003a) – Electrofishing and its harmful effects on fish, Denver, CO., U.S. Geological Survey Biological Resources Division. U.S. Government Printing Office.
- SNYDER D.E. (2003b) – Invited overview : conclusions from a review of electrofishing and its harmful effects on fish, *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 13, p.p. 445-453.
- SPENCER S.L. (1967) – Internal injuries of largemouth bass and bluegills caused by electricity, *Progressive Fish-Culturist*, 29, p.p. 168-169.

SREMSKI W. (2001) – « Héron » et « Martin Pêcheur ». Tests comparatifs.

TAYLOR A.L., SOLOMON D.J. (1979) – Critical Factors in the Transport of Living Freshwater Fish — I. General Considerations and Atmospheric Gases, *Aquaculture Research*, 10, 1, p.p. 27-33.

TAYLOR G.N., COLE L.S., SIGLER W.F. (1957) – Galvanotoxic response of fish to pulsating direct current, *Journal of Wildlife Management*, 21, p.p. 201-213.

TOMANOVA S. *et al.* (2013) – Systematic point sampling of fish communities in medium- and large-sized rivers: sampling procedure and effort, *Fisheries Management and Ecology*, 20, 6, p.p. 533-543.

VEHANEN T. *et al.* (2013) – Assessing electric fishing sampling effort to estimate stream fish assemblage attributes, *Fisheries Management and Ecology*, 20, 1, p.p. 10-20.

VIBERT R. (1968) – Applications de l'électricité à la biologie et à l'aménagement des pêches continentales, in Applications de l'électricité à la biologie et à l'aménagement des pêches continentales. Symposium de Belgrade, mai 1966., Paris, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. INRA, p.31-73.

VIBERT R. (1967) – Rapport général sur les applications de l'électricité à la biologie et à l'aménagement des pêches continentales, Comité des eaux intérieures. IX Session ; Split, 4-10-XII-1967. Conseil Général des Pêches pour la Méditerranée. Food and Agriculture Organization of the United Nations., p.p. 53 pages.

VIBERT R., CUINAT R. (1961) – Possibilités actuelles de la pêche électrique en France, *Bulletin Français de Pisciculture*, 200, p.p. 89-98.

VIGNERON T., TOMANOVA S., ROSET N. (2013) – Test *in situ* des matériels de pêche électrique Héron et EFKO, Rapport Technique ONEMA, p.p. 10 pages.

VINCENT R. (1971) – River electrofishing and fish population estimates, *The Progressive Fish-Culturist*, 33, p.p. 163-169.

WHALEY R.A., MAUGHAN O.E., WILEY P.H. (1978) – Lethality of Electroshock to Two Freshwater Fishes, *The Progressive Fish-Culturist*, 40, 4, p.p. 161-163.

WHITNEY L.V., PIERCE R.L. (1957) – Factors controlling the input of electrical energy into a fish (*Cyprinus carpio* L.) in an electrical field, *Limnology and Oceanography*, 2, 2, p.p. 55-61.

WYDOSKI R.S. (1980) – Effects of electric current on fish and invertebrates.

ZALEWSKI M. (1983) – The influence of fish community structure on the efficiency of electrofishing, *Aquaculture Research*, 14, 4, p.p. 177-186.

ZALEWSKI M., COWX I.G. (1990) – Factors affecting the efficiency of electric fishing, in Fishing with electricity, applications in freshwater fisheries management, Oxford, England, Blackwell Scientific Publications, Ltd, p.89-111.

13 Annexes

13.1 Annexe 1 - Valeurs des résistances équivalentes des électrodes

Tableau 11. Résistances équivalentes d'électrodes mesurées pour une conductivité ambiante de 350 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
Source : Pottier et al. 2020

Types d'électrode	Forme	Métal	Modèles	Dimensions	Résistance (Ω) pour 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Sources
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 10 cm; section transversale: 0,6 cm	73	Beaumont et al. (2005)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 20 cm; section transversale: 0,6 cm	41	Pottier et al. (2014)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 20 cm; section transversale: 0,6 cm	47	Beaumont et al. (2005)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 20 cm; section transversale: 1 cm	44	Beaumont et al. (2005)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 29 cm; section transversale: 0,6 cm	24	Beaumont et al. (2005)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anode EL63II (Hans Grassl) acier inoxydable	Diamètre: 30 cm	31	Pottier et al. (2014)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 30 cm; section transversale: 0,6 cm	38	Pottier et al. (2014)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 32,5 cm; section transversale: 1,2 cm	30	Beaumont et al. (2005)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 38 cm; section transversale: 1,5 cm	27	Beaumont et al. (2005)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau ELT60II (Hans Grassl) acier inoxydable	Diamètre: 40 cm de diamètre	28	Pottier et al. (2014)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 40 cm; section transversale: 0,6 cm	30	Pottier et al. (2014)

Types d'électrode	Forme	Métal	Modèles	Dimensions	Résistance (Ω) pour 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Sources
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 40 cm; section transversale: 0,6 cm	28	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 40 cm; section transversale: 1 cm	27	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 40 cm; section transversale: 2 cm	25	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 50 cm; section transversale: 0,6 cm	25	Pottier <i>et al.</i> (2014)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 60 cm; section transversale: 0,6 cm	22	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 60 cm de diamètre; section transversale: 1 cm	21	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 60 cm; section transversale: 2 cm	19	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Anode	Anneau	Aluminium	Anneau LR-24 (Smith Root) aluminium	Diamètre: 28 cm	37	Pottier <i>et al.</i> (2014)
Anode	Anneau	Aluminium	Anneau Martin Pêcheur® (Dream Electronique) aluminium	Diamètre: 35 cm	31	Pottier <i>et al.</i> (2014)
Anode	Anneau	Aluminium	Anneau aluminium	Diamètre: 36 cm	25	Kolz (1993)
Anode	Anneau	Aluminium	Anneau aluminium	Diamètre: 61 cm	13	Kolz (1993)
Anode	Assemblage anneau + barres	Aluminium	Assemblage en aluminium de barres de 60 cm de long sur un anneau de 30,5 cm de diamètre	4 barres de 0,64 cm de section transversale	16	Kolz (1993)
Anode	Assemblage anneau + barres	Aluminium	Assemblage en aluminium de barres de 60 cm de long sur un anneau de 58 cm de diamètre	4 barres de 0,64 cm de section transversale	13	Kolz (1993)
Anode	Assemblage anneau + barres	Aluminium	Assemblage en aluminium de barres de 60 cm de long sur un anneau de 30,5 cm de diamètre	4 barres de 2,54 cm de section transversale	13	Kolz (1993)
Anode	Assemblage anneau + barres	Aluminium	Assemblage en aluminium de barres de 60 cm de long sur un anneau de 58 cm de diamètre	4 barres de 2,54 cm de section transversale	11	Kolz (1993)
Anode	Assemblage anneau + barres	Aluminium	Assemblage en aluminium de barres de 60 cm de long sur un anneau de 30,5 cm de diamètre	6 barres de 0,64 cm de section transversale	14	Kolz (1993)

Types d'électrode	Forme	Métal	Modèles	Dimensions	Résistance (Ω) pour 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Sources
Anode	Assemblage anneau + barres	Aluminium	Assemblage en aluminium de barres de 60 cm de long sur un anneau de 30,5 cm de diamètre	6 barres de 2,54 cm de section transversale	12	Kolz (1993)
Anode	Assemblage anneau + barres	Aluminium	Assemblage en aluminium de barres de 60 cm de long sur un anneau de 58 cm de diamètre	6 barres de 2,54 cm de section transversale	9	Kolz (1993)
Anode	Cylindre	Aluminium	Cylindre en aluminium	Longueur: 60 cm; largeur: 0,64 cm	41	Kolz (1993)
Anode	Cylindre	Aluminium	Cylindre en aluminium	Longueur: 60 cm; largeur: 1,27 cm	33	Kolz (1993)
Anode	Cylindre	Aluminium	Cylindre en aluminium	Longueur: 60 cm; largeur: 2,54 cm	28	Kolz (1993)
Anode	Cylindre	Aluminium	Cylindre en aluminium	Longueur: 60 cm; largeur: 5,08 cm	23	Kolz (1993)
Anode	Goutte	Acier inoxydable	Anneau canne anglaise ELT60II (Hans Grassl) acier inoxydable en forme de goutte	Longueur: 36 cm; largeur: 32 cm	31	Pottier <i>et al.</i> (2014)
Anode	Sphère	Aluminium	Sphère en aluminium	Diamètre: 15,2 cm	25	Kolz (1993)
Anode	Sphère	Aluminium	Sphère en aluminium	Diamètre: 27,7 cm	16	Kolz (1993)
Anode	Sphère	Acier	Sphère en acier	Diamètre: 15 cm	42	Reynolds (2016)
Anode	Sphère	Acier	Sphère en acier	Diamètre: 30 cm	20	Reynolds (2016)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 15 cm; section transversale: 0,3 cm	75	Reynolds (2016)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 15 cm; section transversale: 0,6 cm	67	Reynolds (2016)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 15 cm; section transversale: 1 cm	63	Reynolds (2016)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 15 cm; section transversale: 1,3 cm	61	Reynolds (2016)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 30 cm; section transversale: 0,3 cm	43	Reynolds (2016)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 30 cm; section transversale: 0,6 cm	39	Reynolds (2016)
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 30 cm; section transversale: 1 cm	37	Reynolds (2016)

Types d'électrode	Forme	Métal	Modèles	Dimensions	Résistance (Ω) pour 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Sources
Anode	Anneau	Acier inoxydable	Anneau acier inoxydable	Diamètre: 30 cm; section transversale: 1,3 cm	35	Reynolds (2016)
Anode	Cylindre	Acier inoxydable	Cylindre acier inoxydable	Longueur: 48 cm; section transversale: 0,3 cm	68	Reynolds (2016)
Anode	Cylindre	Acier inoxydable	Cylindre acier inoxydable	Longueur: 48 cm; section transversale: 0,6 cm	59	Reynolds (2016)
Anode	Cylindre	Acier inoxydable	Cylindre acier inoxydable	Longueur: 48 cm; section transversale: 1 cm	54	Reynolds (2016)
Anode	Cylindre	Acier inoxydable	Cylindre acier inoxydable	Longueur: 48 cm; section transversale: 1,3 cm	51	Reynolds (2016)
Anode	Cylindre	Acier inoxydable	Cylindre acier inoxydable	Longueur: 96 cm; section transversale: 0,3 cm	39	Reynolds (2016)
Anode	Cylindre	Acier inoxydable	Cylindre acier inoxydable	Longueur: 96 cm; section transversale: 0,6 cm	35	Reynolds (2016)
Anode	Cylindre	Acier inoxydable	Cylindre acier inoxydable	Longueur: 96 cm; section transversale: 1 cm	32	Reynolds (2016)
Anode	Cylindre	Acier inoxydable	Cylindre acier inoxydable	Longueur: 96 cm; section transversale: 1,3 cm	30	Reynolds (2016)
Cathode	Barre + Tresses	Cuivre	Cathode cuivre Héron® (Dream Electronique) Enroulée	Longueur: 85 cm; largeur: 1 cm; épaisseur: 0,3 cm	37	Pottier <i>et al.</i> (2014)
Cathode	Barre + Tresses	Cuivre	Cathode cuivre Héron® (Dream Electronique) Bien étalée	Longueur: 85 cm; largeur: 1 cm; épaisseur: 0,3 cm	7	Pottier <i>et al.</i> (2014)
Cathode	Câble	Acier inoxydable	Cathode acier inoxydable LR-24 (Smith Root)	Longueur: 110 cm; largeur: 0,5 cm	32	Pottier <i>et al.</i> (2014)
Cathode	Maille	Acier	Maille d'acier	Longueur: 25 cm; largeur: 25 cm; épaisseur: 1,3 cm	49	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Cathode	Maille	Acier	Maille d'acier	Longueur: 50 cm; largeur: 50 cm; épaisseur: 1,3 cm	27	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Cathode	Maille	Acier	Maille d'acier	Longueur: 75 cm; largeur: 75 cm; épaisseur: 1,3 cm	19	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Cathode	Maille	Aluminium	Maille d'aluminium perforé	Longueur: 16 cm; largeur: 10 cm	60	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Cathode	Maille	Aluminium	Maille d'aluminium perforé	Longueur: 29 cm; largeur: 39 cm	35	Beaumont <i>et al.</i> (2005)

Types d'électrode	Forme	Métal	Modèles	Dimensions	Résistance (Ω) pour 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Sources
Cathode	Maille	Aluminium	Maille d'aluminium expansé	Longueur: 60 cm; largeur: 55 cm; épaisseur: 2,54 cm	26	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Cathode	Plaque horizontale	Acier inoxydable	Tôle perforée en acier inoxydable	Longueur: 50 cm; largeur: 50 cm; épaisseur: 0,6 cm	21	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Cathode	Plaque horizontale	Aluminium	Plaque d'aluminium	Longueur: 41 cm; largeur: 30 cm; épaisseur: 0,2 cm	34	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Cathode	Plaque verticale	Aluminium	Plaques verticales en aluminium	Épaisseur: 0,32 cm; largeur: 122 cm; immersion: 15,2 cm	15	Kolz (1993)
Cathode	Plaque verticale	Aluminium	Plaques verticales en aluminium	Épaisseur: 0,32 cm; largeur: 122 cm; immersion: 30,5 cm	11	Kolz (1993)
Cathode	Plaque verticale	Aluminium	Plaques verticales en aluminium	Épaisseur: 0,32 cm; largeur: 122 cm; immersion: 45,7 cm	9	Kolz (1993)
Cathode	Treillis	Acier	Treillis d'acier soudé	Longueur: 17 cm; largeur: 17 cm; épaisseur: 2,54 cm	64	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Cathode	Treillis	Acier	Treillis d'acier soudé	Longueur: 40 cm; largeur: 29 cm; épaisseur: 2,54 cm	34	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Cathode	Tresse	Cuivre	Tresse en cuivre	Longueur: 150; largeur: 2,5 cm; épaisseur: 0,3 cm	31	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Cathode	Tresse	Cuivre	Tresse en cuivre	Longueur: 300; largeur: 2,5 cm; épaisseur: 0,3 cm	20	Beaumont <i>et al.</i> (2005)
Cathode	Tresse	Cuivre	Tresse cuivre EL63II (Hans Grassl)	Longueur: 500 cm; largeur: 2,5 cm; épaisseur: 0,3 cm	16	Pottier <i>et al.</i> (2014)
Cathode	Tresse	Cuivre	Tresse en cuivre	Longueur: 75 cm; largeur: 2,5 cm; épaisseur: 0,3 cm	48	Beaumont <i>et al.</i> (2005)

13.2 Annexe 2- Fiches techniques d'engins de pêche à l'électricité

LR-24 Smith Root



Crédits : Smith Root

Alimentation en électricité :
Batterie en plomb ou lithium de 24 V

Types de courant : Continu, Continu Pulsé et Salve d'impulsions de courant Continu

Anode : Cercle Aluminium de 28 cm de diamètre

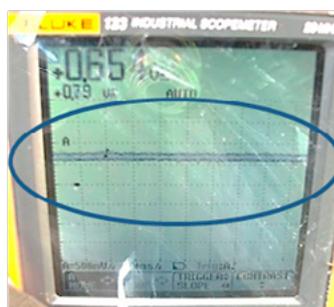
Cathode : Câble Inox de 110 cm de long

Puissance de sortie : 400 W

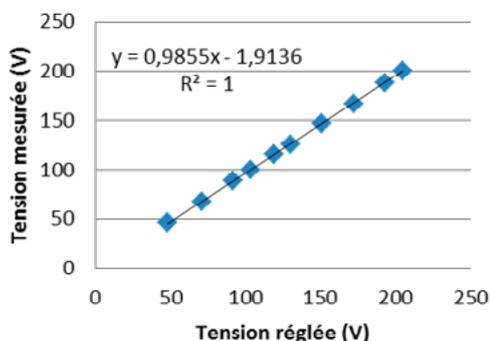
Courant Continu

Réglage de la Tension : Boutons sélecteurs de la tension de 50 Volt à 990 Volt par pas de 5 Volt.

Tension maximale : 300/500 Volt selon la conductivité.



Forme du Courant Continu fourni par le LR-24



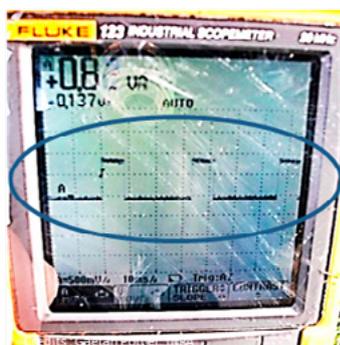
Courant Continu Pulsé

Réglage de la Tension : Boutons sélecteurs de la tension de 50 Volt à 990 Volt par pas de 5 Volt.

Pic de tension maximal : 990 Volt selon la conductivité.

Réglage de la Fréquence : Bouton rotatif, réglage en continu.

Réglage du Rapport Cyclique : Automatique, en fonction de la conductivité.



Forme du Courant Continu Pulsé fourni par le LR-24

Figure 2-1. Fiche pratique présentant le LR-24, Smith Root®. Source : Pottier (2014).

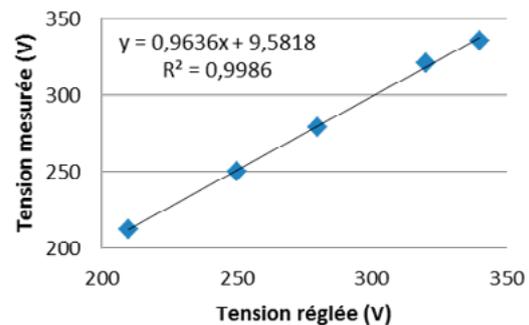
ELT60II Hans Grassl

Courant Continu

Réglage de la Tension : Levier accélérateur, réglage en continu.
Tension maximale : 300/500 Volt selon la conductivité.



Forme du Courant Continu fourni par le ELT 60 II

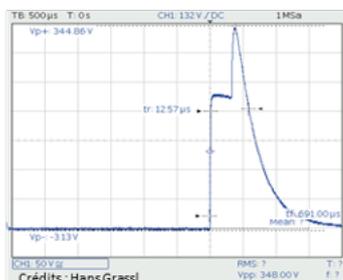


Courant Continu Pulsé

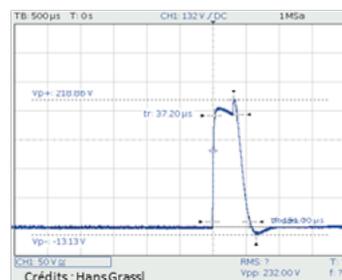
Réglage de la Tension : Levier accélérateur, réglage en continu.
Tension maximale : 940 V selon la conductivité.
Réglage de la Fréquence : Bouton rotatif, réglage en continu.
Réglage du Rapport Cyclique : Automatique, en fonction de la conductivité.



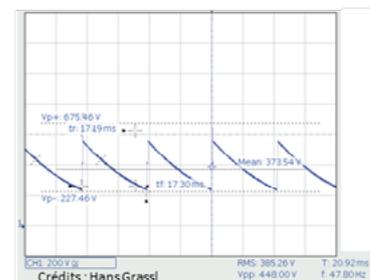
Alimentation en électricité :
Groupe électrogène 1500 VA
Types de courant : Continu et Continu Pulsé
Anode : Cercle Inox de 40 cm de diamètre avec des attaches pour un filet
Cathode : Tresse en cuivre de 210 cm * 1,5 cm
Puissance de sortie : 1300 W



Conductivité : 30 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
Décharge lente



Conductivité : 4000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
Décharge rapide



Conductivité : Très faible
Décharge incomplète

Figure 2-2. Fiche pratique présentant l'ELT 60II, Hans Grassl®. Source : Pottier (2014).

Martin-Pêcheur Dream Electronique

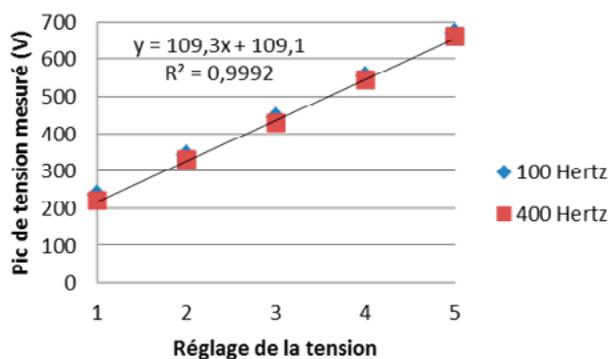


Forme du Courant Continu Pulsé fourni par le Martin Pêcheur

Courant Continu Pulsé

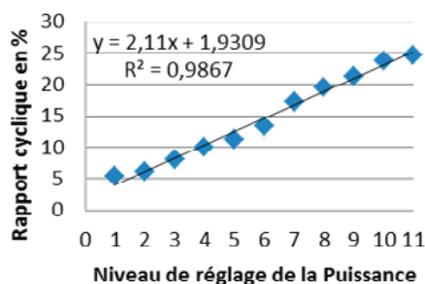
Réglage de la Tension : Bouton rotatif, paliers de 1 à 5 .

Pic de Tension maximal : 650 V selon la conductivité.



Réglage de la Fréquence : Sélecteur de 2 fréquences (100 et 400 Hertz).

Réglage du Rapport Cyclique : Bouton Rotatif de la Puissance (11 niveaux possibles). Plus on augmente la valeur du bouton Puissance, plus le rapport cyclique augmente. Le maximum est de 25 %.

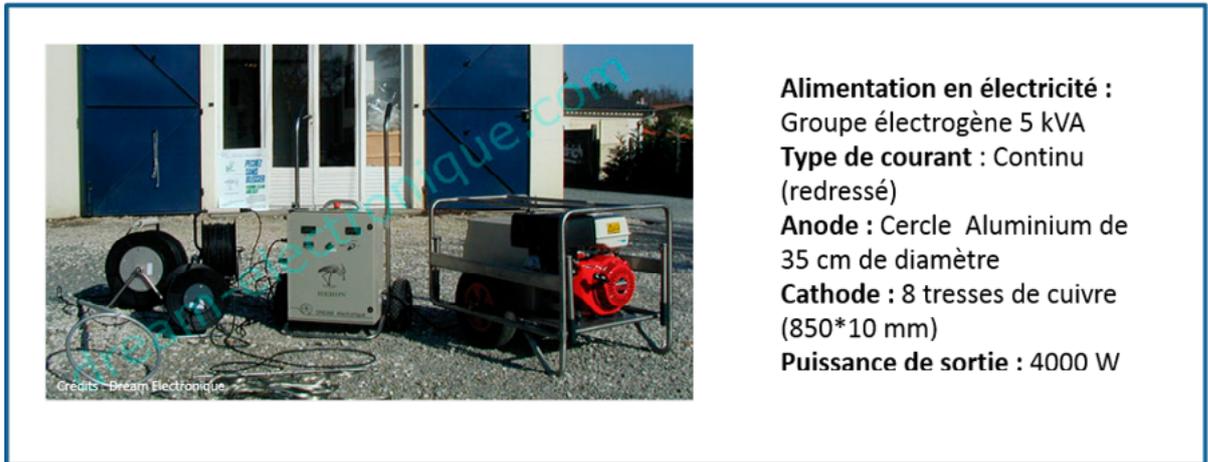


Mesures effectuées pour une fréquence de 400 Hertz et un réglage de tension de 3

La valeur de la Puissance en % : Elle correspond au pourcentage de la Puissance Maximale que peut fournir l'appareil dans les conditions actuelles de pêche. Elle est directement liée au rapport cyclique et à la tension.

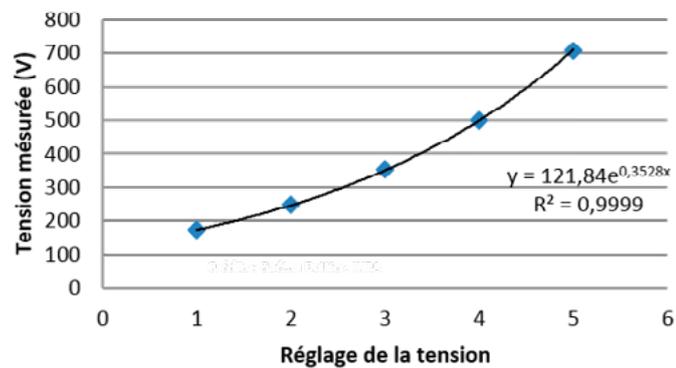
Figure 2-3. Fiche pratique présentant le Marin Pêcheur, Dream Electronique. Source: Pottier (2014).

Héron Dream Electronique



Courant Continu

Réglage de la Tension : Bouton rotatif, paliers de 1 à 6.
Tension maximale : 1000 Volt selon la conductivité.



Forme du Courant Continu fourni par le Héron

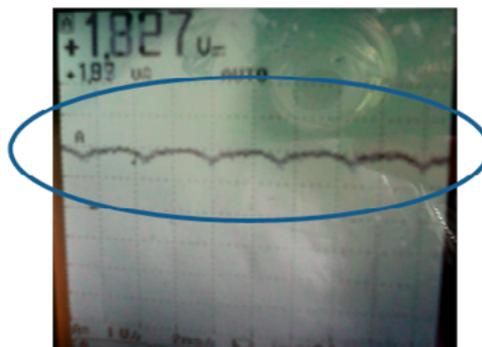
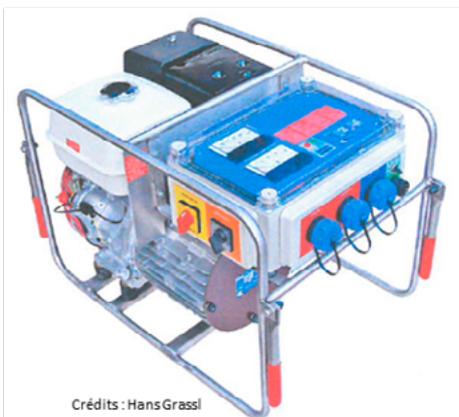


Figure 2-4. Fiche pratique présentant le Héron®, Dream Electronique®. Source: Pottier (2014).

EL63II Hans Grassl

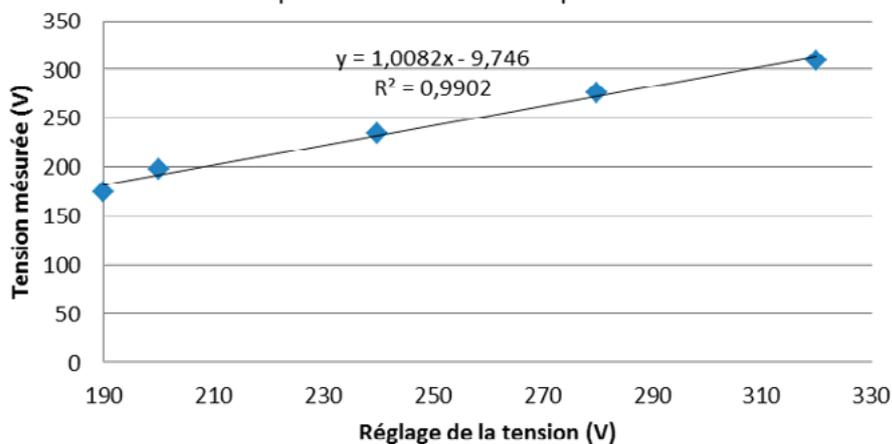


Alimentation en électricité :
Groupe électrogène 5,5 kVA
Type de courant : Continu
(redressé)
Anode : Cercle Acier Inox de
30 cm de diamètre
Cathode : 1 tresse de cuivre
(500*2,5 cm)
Puissance de sortie : 5000 W

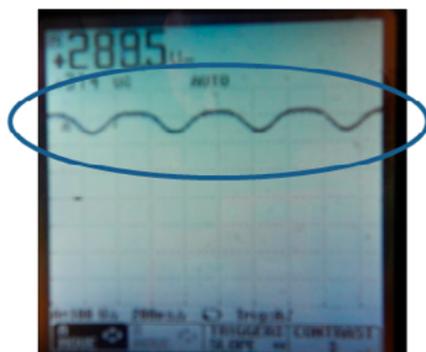
Courant Continu

Réglage de la Tension : Levier accélérateur, réglage en continu et curseur de tension en fonction de la conductivité (1 pour forte /moyenne et 2 pour faible).

Tension maximale : 300 V en position 1 ou 600 V en position 2



Forme du Courant Continu fourni par l'EL63II



FEG1500 EFKO

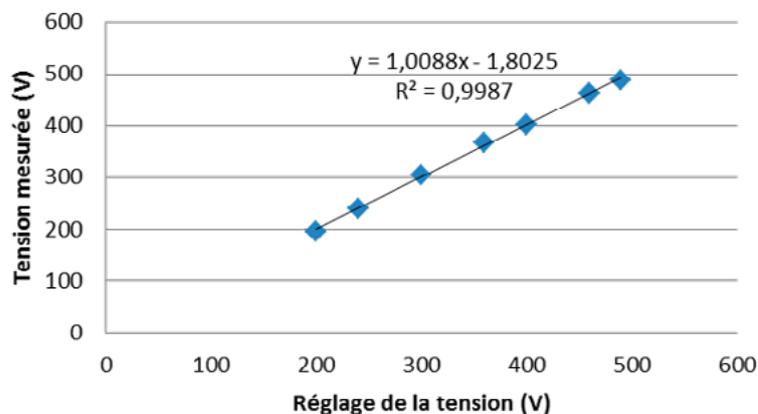


Alimentation en électricité :
Groupe électrogène 1500 VA
Types de courant : Continu
(redressé)
Anode : Cercle Inox de 40 cm
de diamètre
Cathode : Tresse en cuivre de
150 cm * 2 cm
Puissance de sortie : 1500 W

Courant Continu

Réglage de la Tension : Levier accélérateur, réglage en continu et curseur de tension (1 pour faible tension et 2 pour forte tension).

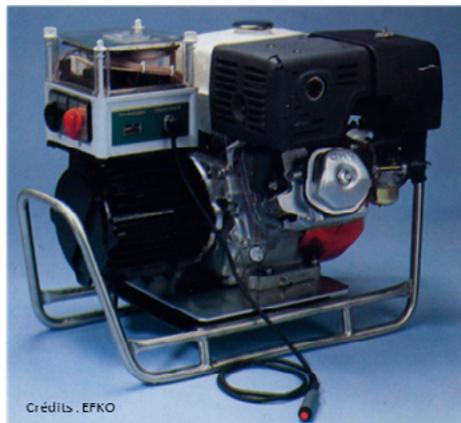
Tension maximale : 300 V en position 1 ou 500 V en position 2.



Forme du Courant Continu fourni par le FEG 1500



FEG8000 EFKO

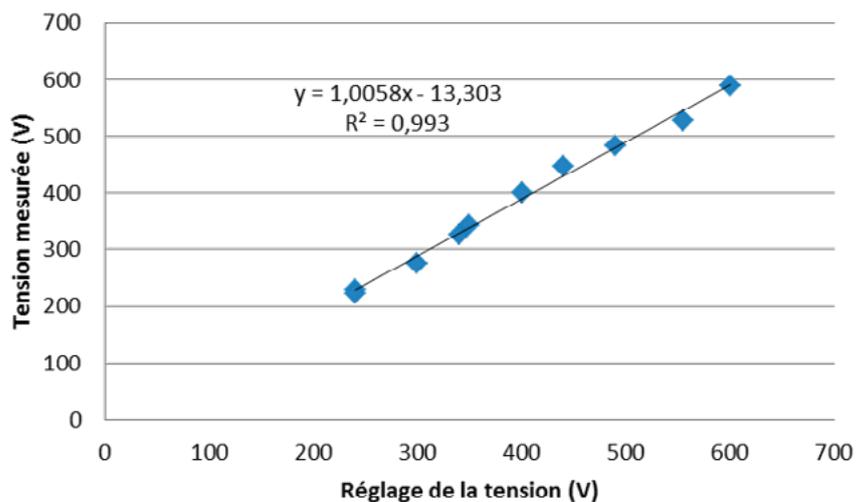


Alimentation en électricité :
Groupe électrogène 8000 VA
Types de courant : Continu
(redressé)
Anode : Cercle Inox de 40 cm
de diamètre
Cathode : Tresse en cuivre de
150 cm * 2 cm
Puissance de sortie : 8000 W

Courant Continu

Réglage de la Tension : Levier accélérateur, réglage en continu et curseur de tension (1 pour faible tension et 2 pour forte tension).

Tension maximale : 300 V en position 1 ou 600 V en position 2.



Forme du Courant Continu fourni par le FEG 8000

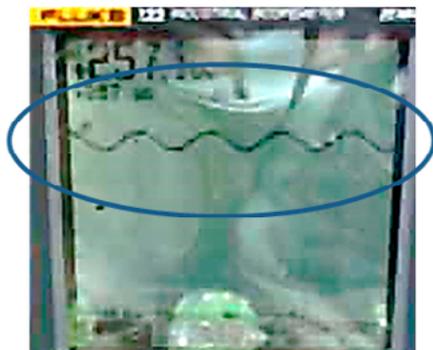


Figure 2-7. Fiche pratique présentant le FEG1500, EFKO®. Source: Pottier (2014).

13.3 Annexe 3 - Fiche technique de fabrication d'une sonde Penny

Matériel nécessaire

- 2 m de tube rigide tubes IRL diam. 16 mm
- 2 té pour tube IRL diam. 16 mm / long. 55 mm
- 2 presse-étoupes diam.16 mm DEBFLEX
- 5 m de fil électrique souple gainé
- Pistolet à colle ou colle PVC/silicone
- Fer à souder + étain
- Fiches électriques rondes diamètre 1 mm
- Fiches bananes pour raccord à l'oscilloscope/voltmètre



Mise en œuvre

1. Couper le tube PVC de la longueur souhaitée (1,20 m pour une utilisation confortable)
2. Couper deux longueurs de fils électrique (env. 1,80 m)
3. Fixer les petites fiches électriques à l'extrémité de chacun des fils électriques (serrage avec pince à dénuder ou/et soudure à l'étain et scotch isolant)
4. Mettre un point de soudure à l'étain pour obturer l'extrémité de chacune des 2 fiches afin de constituer les 2 contacteurs de mesures et d'étanchéifier la sonde. Cette étape doit être réalisée avant de positionner les fiches dans le presse étoupe afin d'éviter de faire fondre le caoutchouc. Positionner les 2 fiches dans les 2 presses étoupes et coller le fil électrique depuis l'intérieur au pistolet à colle ou silicone.



© Thibault Vigneron

5. Positionner les deux presses étoupes dans le té et faire passer les deux fils électriques dans celui-ci avant de fixer l'ensemble à la colle. S'assurer que la distance entre les deux extrémités du té combiné aux presse-étoupes mesure bien 10 cm. Coller abondamment (ou siliconer) afin de garantir l'étanchéité.



© Thibault Vigneron

6. Fermer le té, le coller et l'emboîter au tube rigide PVC. Il faut s'assurer de garantir une étanchéité au niveau de la jonction en utilisant du mastic par exemple. N'oubliez pas de faire passer les deux fils dans le tube rigide. Mettre un tour d'adhésif type scotch américain pour renforcer l'ensemble et mieux visualiser la sonde dans l'eau.



© Thibault Vignerou

7. Positionner les fils dans le second té en position haute du tube PVC rigide. Faire sortir respectivement chacun des fils sur chacun des coté du té et repasser chacun des fils dans le Té de manière à faire une boucle pour chacun des fils afin d'éviter un arrachement des connexions lors des utilisations futures.



© Thibault Vignerou

8. Positionner ce té parallèlement au té inférieur ce qui permettra de bien orienter la sonde Penny lors de son utilisation. Coller ensuite le té supérieur de la sonde (collage des deux parties du T et collage au tube rigide = manche de la sonde).



© Thibault Vignerou

9. Vous avez maintenant constitué votre sonde Penny. Il vous reste juste à faire un point de soudure à l'étain à l'extrémité de chacun des connecteurs situés sur le T inférieur. Cette étape peut être effectuée avant la n°4 pour éviter le risque de faire fondre le caoutchouc du presse-étoupe.

10. Mettre en place les fiches bananes aux extrémités supérieures de chacun des fils afin de raccorder la sonde à votre oscilloscope portable ou votre voltmètre digital.
11. Votre sonde est maintenant prête pour effectuer vos mesures de gradient de tension. Bonnes mesures!!!



Réalisation : Thibault Vigneron (OFB) en collaboration avec Gaétan Pottier (INRAE- Hydréco)

Citation : Pottier G., Azam D., Beaulaton L., Vigneron T., Rives J., Marchand F., Pénil C. 2022. La pêche scientifique à l'électricité dans les milieux aquatiques continentaux. Office français de la biodiversité. Collection Guides et protocoles. 136 pages

Pottier G., Chapon P.M. 2022. Indice d'abondance anguille (IAA). Office français de la biodiversité. Collection Guides et protocoles. 5 pages

Pottier G., Marchand F., Servanti S., Prévost E. 2022. Indice d'abondance saumon (IAS). Office français de la biodiversité. Collection Guides et protocoles. 5 pages

Roussel J.M., Pottier G., Servanti S., Beaulaton L. 2022. VIGITRUIITE®, indice d'abondance truite (IAT). Office français de la biodiversité. Collection Guides et protocoles. 6 pages

Pottier G., Vigneron T. 2022. Pêche toutes espèces et méthodes d'estimation des populations. Office français de la biodiversité. Collection Guides et protocoles. 4 pages

Éditeur : Office français de la biodiversité (OFB)

Édition : Béatrice Gentil-Salasc (OFB)

Création et mise en forme graphique : Parimage

Imprimeur : Estimprim

Gratuit

Dépôt légal à parution

ISSN print : 2607-1312

ISBN web : 978-2-38170-076-2

ISBN print : 978-2-38170-077-9

Achevé d'imprimer en France en avril 2022

Imprimé sur du papier issu de sources responsables

La reproduction à des fins non commerciales, notamment éducatives, est permise sans autorisation écrite à condition que la source soit dûment citée.

La reproduction à des fins commerciales, et notamment en vue de la vente, est interdite sans permission écrite préalable.

La pêche scientifique à l'électricité est une méthode largement utilisée pour les échantillonnages piscicoles en cours d'eau (suivis annuels des populations et des communautés de poissons, approche de types « indices poissons rivière [IPR] » ou indicateurs mono spécifiques saumon, anguille, truite). Cependant l'évolution des matériels, de leurs caractéristiques et des réglages possibles ainsi que la formation des personnels utilisant cette technique nécessitent que soient décrits les principaux facteurs influençant la qualité de ces échantillonnages.

Ce nouveau guide vise à fournir les éléments de compréhension des phénomènes électriques et de la réaction des poissons soumis à un champ électrique. Il synthétise également un ensemble de conseils pour la mise en œuvre de la pêche à l'électricité : configuration des engins de pêche, moyens de prospection, bien-être animal et sécurité/réglementation.

Cet ouvrage est destiné à toutes les personnes souhaitant connaître le fonctionnement de la pêche scientifique à l'électricité ou mettre en œuvre cette méthode de manière adéquate.

