

Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2020-2021

*Les poissons d'eau douce en
tant qu'espèces exotiques
envahissantes*

Sous la direction de Catherine Boisneau

Tanguy Grandmougin

*Les poissons d'eau douce en
tant qu'espèces exotiques
envahissantes :*

Les impacts de la truite (*Salmo Trutta*) et de la
carpe (*Cyprinus Carpio*) dans le monde

Catherine Boisneau

Auteur : Tanguy Grandmougin

2020-2021

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien

Remerciements

Je tiens à remercier Catherine Boisneau pour son investissement continu et de qualité.

Sommaire

La truite (*Salmo trutta*) et la carpe (*Cyprinus carpio*) sont des espèces de poissons d'eau douce faisant partie de la liste des 100 espèces exotiques envahissantes parmi les plus néfastes du monde. Ces deux espèces invasives ont été introduites pour diverses raisons notamment pour l'aquaculture mais aussi pour la pêche de loisir. Bien souvent, elles profitent d'un changement ou d'une dégradation dans le milieu d'introduction rendant les espèces indigènes plus vulnérables afin de pouvoir s'y développer de manière anarchique. Ces deux poissons ont des impacts distincts là où elles sont implantées car elles ne situent pas sur le même niveau trophique mais aussi de par la différence des milieux qu'elles côtoient. En effet, la carpe est un poisson qui apprécie les milieux chauds et lenthiques. Son principal impact est qu'elle augmente la turbidité de l'eau en mettant en suspension des sédiments à cause de son comportement alimentaire et reproducteur. Ainsi, toute la qualité de l'eau est changée ce qui touche toutes les espèces aux alentours. La truite vit dans des eaux froides et bien oxygénées et c'est par la prédation, la compétition et l'hybridation qu'elle va entraîner des déséquilibres dans les populations indigènes. D'après les différentes études, la carpe semble avoir un impact plus alarmant car elle touche pratiquement tous les secteurs : écologique, économique et sanitaire. Alors que la truite semble impacter que l'écologie de son milieu en entraînant une disparition rapide des espèces indigènes. Face à ces divers problèmes, des méthodes pour mesurer leurs impacts ont été mises en place comme la méthode BACI (Before, After, Control, Impact) et la méthode Recovery qui sont les deux démarches les plus utilisées. Ainsi, la compréhension de leurs effets néfastes permet de mettre en place des solutions pour réduire au maximum leurs impacts. Cependant, les intérêts économiques qu'elles procurent en aquaculture et pour la pêche de loisir font que les démarches pour contrôler les populations et donc limiter leurs impacts, restent insuffisantes. De plus d'autres études sont nécessaires pour avoir un recul suffisant sur l'efficacité des méthodes mises en place.

Table des matières

Présentation du sujet :	1
Introduction :	1
Le choix des espèces, problématique et hypothèse :	2
Synthèse des différents impacts	4
Carpe :	4
Truite :	8
Mesure de l'impact de la carpe	10
Méthode pour réduire l'impact de la carpe	13
Les méthodes directes :	13
Méthode indirecte :	15
Mesure de l'impact de la truite (Salmo Trutta)	21
Méthode pour réduire l'impact de la truite	25
Discussion :	27
Comparaison des méthodes pour mesurer l'impact entre la truite et la carpe :	27
Comparaison des méthodes pour réduire l'impact :	29
Conclusion :	31
Bibliographie :	32

Table des figures et tableaux :

Figure 1 : Schéma théorique de la dynamique des espèces conduisant à des invasions biologiques. (Richardson et al. 2000).....	1
Figure 2 : Raisons des introductions des espèces en France. (P. Keith et Allardi 1997)	2
Figure 3 : Illustration de l'impact avec carpe sur l'image de gauche, et sans carpe à droite (https://www.carp.gov.au/the-carp-problem	6
Figure 4 : Schéma modifié par Tanguy Grandmougin montrant l'impact de la carpe en eau douce d'après Vilizzi et al	7
Figure 5 : Schéma récapitulatif des différents impacts de la truite fario (Auteur : Tanguy Grandmougin).(Carosi, Bonomo, et Lorenzoni 2020), (Townsend 1996) (P. E. Budy et al. 2020).	9
Figure 6 : Méthode BACI (Koehn and al). Les flèches indiquent la direction du changement ou l'échelle temporelle (avant après).	10
Figure 7 : Méthode Recovery (Koehn and al). Les flèches indiquent la direction du changement ou l'échelle temporelle (avant après).	11
Figure 8 : Photo de la barrière grillagée pour empêcher les carpes d'atteindre la zone de reproduction http://www.fishfiles.com.au/Media/FISH-Magazine/FISH-Vol-25-3/Tar-Rus-native-nursery-trial	15
Figure 9: Graphique représentant la diversité d'espèce en fonction de la régulation du débit (Roberts et al. 1997).....	16
Figure 10: William Cage : Cage permettant de séparer les carpes (poisson noir) des autres poissons (gris) (Stuart et al. 2011).....	18
Figure 11: "William Cage"(Stuart et al. 2011)	19
Figure 12: Réponse du système avant et après éradication de la truite fario en 2009-2011 (Laplanche et al. 2018). Couleurs : truite fario (orange), truite fardée (vert clair).	24
Figure 13 : Réponse qui entrainerait à une éradication de la truite fario (Laplanche et al. 2018). Légende : truite fario : orange, truite fardée : vert clair	29
Figure 14: Simulation du modèle avec une faible réponse de la truite fardée après éradication de la truite fario (Laplanche et al. 2018). Légende : truite fario : orange, truite fardée : vert clair.	29
Tableau 1: Risque d'impact de la carpe dans les différents pays où des études ont été réalisées (Vilizzi, Tarkan, et Copp 2015).	5
Tableau 2 : résumé des différents tests et méthodes utilisés pour quantifier l'impact de la carpe sur ces différents facteurs (Marshall et al. 2019).....	12
Tableau 3 : Les différentes méthodes directes pour réduire l'impact de la carpe	20
Tableau 4 : Les différentes méthodes indirectes pour réduire l'impact de la carpe	21
Tableau 5: : Méthodes et facteurs mesurés pour voir l'impact des truites fario sur les truites fardées d'après McHugh et Budy (2006) sur les trois sites différents	23
Tableau 6 : Résumé des différentes méthodes pour réduire l'impact de la truite.	27

Présentation du sujet :

Introduction :

La mondialisation avec l'augmentation des commerces, des voyages et du transport de marchandises a été bénéfique pour de nombreux pays, cependant elle a également facilité la propagation des espèces exotiques envahissantes (EEE) à travers le monde (McNeely et al. 2001) . Les EEE peuvent être définies comme des espèces introduites (volontairement ou accidentellement) par l'Homme, dans un nouveau territoire hors de son aire de distribution naturelle, dont l'implantation et la propagation menacent les écosystèmes, les habitats ou les espèces indigènes avec des conséquences sur les services écologiques et/ou socio-économiques et/ou sanitaires négatives. Ces espèces possèdent des traits biologiques en commun : un développement rapide les rendant très compétitives par rapports aux autres espèces, une capacité d'adaptation et une résistance supérieure, une capacité de reproduction importante et peu de prédateurs naturels (UICN, 2016).

Le processus d'invasion d'une espèce se déroule en cinq étapes (figure 1), une espèce sur 1000 devient invasive après avoir quittée son territoire d'origine.

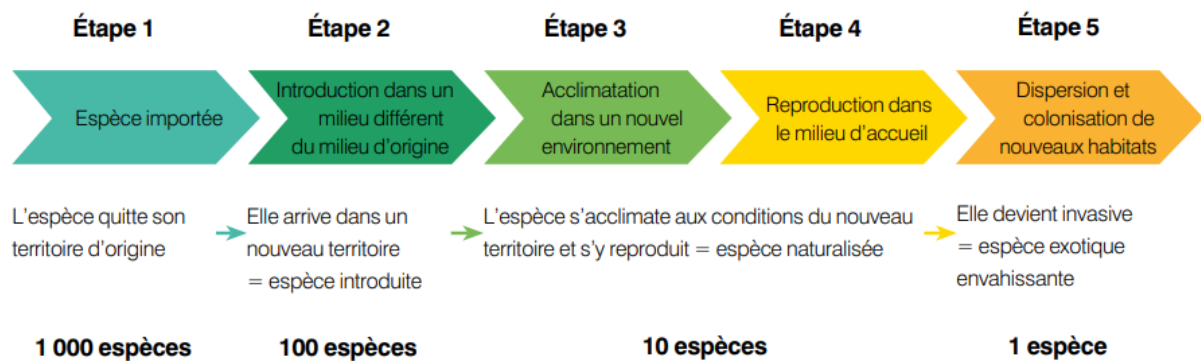


Figure 1 : Schéma théorique de la dynamique des espèces conduisant à des invasions biologiques. (Richardson et al. 2000)

D'après l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) il est bon de distinguer espèce exotique, c'est à dire une espèce introduite mais qui n'a pas forcément d'impacts négatifs, et les espèces exotiques envahissantes qui sont à l'origine d'impacts importants de manière directes ou indirectes. Les impacts des EEE peuvent être regroupés selon cinq catégories (UICN, 2016) :

1-Impacts sur la biodiversité : ces espèces entraînent une compétition avec les espèces indigènes et peuvent transmettre des parasites et maladies, ce qui peut être responsable d'une disparition de certaines espèces.

2-Impacts sur le fonctionnement des milieux : changements des propriétés du sol, des plans d'eau et cours d'eau (érosion des berges...).

3-Impacts sur la santé humaine : certaines espèces peuvent être vectrices et/ou des réservoirs de maladies.

4-Impacts socio-économiques : elles peuvent engendrer des pertes de production, des dégâts divers et des coûts pour les gérer. On estime que la gestion des EEE à l'échelle européenne aurait des coûts annuels dépassant 12 milliards d'euros. Les impacts des EEE sont vastes, ils peuvent toucher aussi bien le domaine agricole que celui de la santé.

5- Impact sur la sécurité humaine : dans les milieux aquatiques, les densités importantes de certaines espèces entraînent des problèmes comme dans des systèmes de refroidissement des centrales électriques.

Au niveau mondial et européen, des dispositions juridiques sont mises en place afin de lutter contre les EEE, par exemple, la convention CITES (Commerce International des Espèces Sauvages) témoigne d'une prise de conscience de cet enjeu au niveau mondial. Un règlement européen a été aussi mis en place le 22 octobre 2014, il est relatif à la prévention et à la gestion de l'introduction et de la propagation des EEE dans l'Union Européenne (Règlement (UE) N°1143/2014). D'après l'UICN, l'objectif au niveau mondial est que : « D'ici 2020, les espèces exotiques envahissantes et les voies d'introductions soient identifiées et classées en ordre de priorité, les espèces prioritaires soient contrôlées ou éradiquées et que des mesures soient en place pour gérer les voies de pénétration, afin d'empêcher l'introduction et l'établissement de ces espèces » (UICN, 2016).

En France, l'UICN a déclaré que les EEE constituent la troisième source de perte de biodiversité sur la planète (*Le Monde.fr*, 2019). Il est vrai qu'une espèce de poissons d'eau douce sur cinq est menacée et la majorité de ces espèces sont importées volontairement ou involontairement notamment à cause des activités humaines pour des fins commerciales, ou même sportives (UICN, 2016).

En France environ 36% des espèces ont été introduites pour le loisir pêche, suivie, à égalité, par la curiosité scientifique et par la lutte biologique (19%) puis par accidents (15%) et pour l'aquaculture (11%) (figure 2) (P. Keith et Allardi 1997).

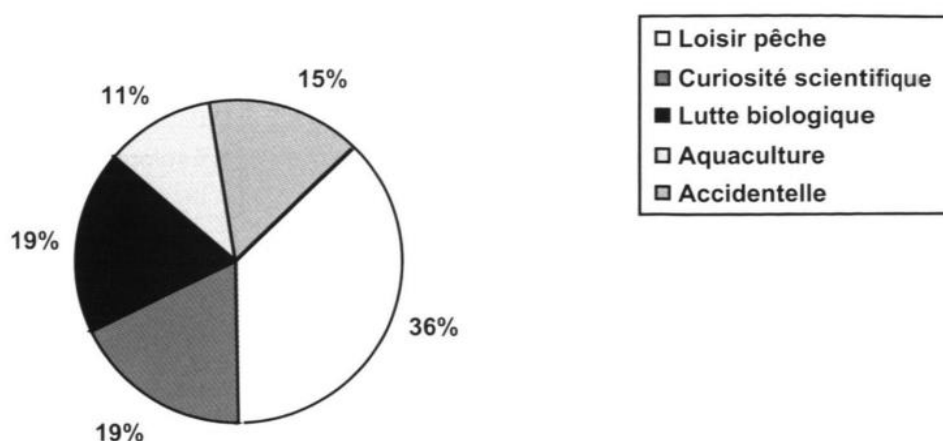


Figure 2 : Raisons des introductions des espèces en France. (P. Keith et Allardi 1997)

Les différentes études et recherches liées aux EEE montrent qu'elles représentent un véritable problème dans certains pays d'introduction.

Le choix des espèces, problématique et hypothèse :

Les poissons d'eau douce constituent le groupe le plus impacté par les espèces invasives. La carpe (*Cyprinus Carpio*) et la truite fario (*Salmo trutta*) qui sont des poissons connus en Europe font partie de la liste des 100 espèces exotiques envahissantes parmi les plus néfastes du monde (IUCN-The World Conservation Union et Invasive Species Specialist Group 2000).

La carpe est un poisson qui appartient à la famille des cyprinidés. Elle a été introduite dans de nombreux pays à travers le monde car c'est une espèce appréciée en aquaculture pour la pêche de loisir et elle peut être utilisée comme espèce ornementale (Koehn et al. 2000). Elle affectionne les eaux stagnantes ou lentes (étangs, lacs, rivières) avec des substrats de vase ou de sable riche en végétation aquatique. C'est un poisson se nourrissant principalement de débris végétaux, mais aussi de petits mollusques, vers et larves d'insectes vivant dans la vase. La carpe « fouille » le fond du cours d'eau de manière à trouver sa nourriture (Keith et al. 2011). Cette espèce de par son alimentation, sa capacité de résistance importante face aux conditions environnementales et d'autres phénomènes expliqués dans la partie résultat entraîne de nombreux impacts sur les écosystèmes aquatiques (Koehn et al. 2000).



Image de Carpe commune (<https://pixabay.com/fr/illustrations/isol%C3%A9-carpe-poisson-d-eau-douce-2499539/>)

La truite est un poisson différent de la carpe car elle va apprécier des eaux beaucoup plus fraîches, en effet elle supporte mal des eaux supérieures à 17°C. C'est une espèce lithophile, qui dépend donc de substrats minéraux (pierreux) sur lesquels elle se reproduit (Crowl et al. 1992). Ce poisson se nourrit principalement d'invertébrés benthiques et les gros individus vont être plutôt piscivores, en se nourrissant de chabots, vairons, loches et d'autres juvéniles (Philippe Keith et al. 2011). La truite est l'un des poissons les plus recherchés par les pêcheurs, c'est pour cette raison qu'elle a été introduite dans plusieurs endroits du globe (Jones et al. 2017). Son impact est important dans différents pays où elle a été implantée notamment du fait de la prédation, la compétition et l'hybridation qu'elle entraîne sur les espèces présentes (Townsend 1996) (Carosi et al. 2020).



Image de Truite fario (<https://www.mrqoodfish.com/espece/truite-fario/>)

D'après l'INPN, la truite fait partie de la liste des espèces de poissons protégés sur l'ensemble du territoire Français national (« Liste des espèces de poissons protégées sur l'ensemble du territoire français national » s. d.).

L'objet de ce PFE est dans un premier temps, d'identifier les impacts directs et indirects de la truite (*Salmo Trutta*) et de la carpe (*Cyprinus Carpio*) dans les écosystèmes d'introduction en dehors de l'Europe. Puis d'étudier dans un second temps les méthodes mises en place pour mesurer et réduire l'impact de ces deux espèces. La truite (*Salmo Trutta*) et la carpe (*Cyprinus Carpio*) ont été choisies comme cas d'étude, car ce sont des espèces qui vont entraîner d'importants impacts dans les différents lieux d'introductions.

Ces deux espèces étant différentes, il est intéressant de pouvoir les comparer entre elles au niveau de leurs impacts dans les différents écosystèmes d'introductions, mais aussi les méthodes qui seront prises pour mesurer et réduire leurs effets néfastes.

A partir des différents constats faits précédemment, la problématique suivante a été posée : la truite et la carpe sont des poissons bien implantés dans nos cours d'eau et même soumis à une certaine

protection (truite), cependant quels vont être leurs impacts sur les écosystèmes aquatiques dans d'autres endroits du globe ? Et comment mesurer et gérer l'impact de ces espèces ?

Ainsi, deux hypothèses peuvent être posées. La première hypothèse est que ces deux espèces auront des impacts négatifs dans leurs lieux d'introductions. La deuxième hypothèse est qu'en fonction de leur position dans les niveaux trophiques les deux espèces auront des impacts différents.

Synthèse des différents impacts

Carpe :

Les différents auteurs sont unanimes sur l'impact de la carpe notamment en Australie. Il est vrai que suivant le pays les impacts vont être plus ou moins perçus différemment. En effet d'après Vilizzi et al (2015), pas moins de 129 expériences évaluant l'impact des carpes sur les écosystèmes aquatiques dans 19 pays différents ont été réalisées. Les différentes expériences ont été réalisées en laboratoire et en condition réelle.

Ainsi ces études ont testé l'impact de la carpe sur différents critères : la turbidité, l'azote, le phosphore, le phytoplancton (chlorophylle a), les macrophytes, le zooplancton, les invertébrés benthiques et sur les amphibiens. En effet, une proportion considérablement élevée d'études (entre 66 % et 87%) a montré que la carpe augmentait la turbidité (solides en suspension), l'azote, le phosphore et la biomasse de phytoplancton. Cependant, 13 à 29% de ces évaluations n'ont détecté aucun effet de la carpe et 2 à 5% ont constaté une diminution. De plus, dans 68% à 90% des expériences, une diminution de l'abondance des macrophytes aquatiques, des invertébrés benthiques et des poissons a été constatée même si la carpe affichait un faible impact sur ces critères. Ces études ont été réalisées dans 19 pays différents. Ainsi pour chaque critère impacté, un score de 1 est donné et chaque score correspondant à un critère impacté est additionné pour pouvoir émettre un score de risque (Tableau 1). Quand il n'y a aucun impact, un score de 0 est attribué.

Différentes fenêtres de risques sont utilisées : un faible risque correspond à un score de 2 à 4, un risque moyen à un score de 5 à 8 et un risque fort à un score de 9 à 11.

Tableau 1: Risque d'impact de la carpe dans les différents pays où des études ont été réalisées (Vilizzi, Tarkan, et Copp 2015).

Risk	Outcome score	Country	Continent	Criteria				Sample reference(s)
				Status	Invasiveness	Public perception	Scientific concern	
No	0	Hungary	Europe	Native	None	Positive	None	Bakos and Gorda (2001); Specziár and Turcsányi (2015)
Low	2	Poland	Europe	Naturalized	None	Positive	None	Szücs et al. (2007); Nieoczym and Kloskowski (2014, 2015)
Low	3	Turkey	Europe	Semi-native	Low	Positive	Low	Vilizzi (2012); Tarkan et al. (2014)
Low	4	China	Asia	Semi-native	Moderate	Positive	Low	Yan et al. (2001); Tang and Chen (2012)
Low	4	Germany	Europe	Naturalized	Low	Positive	Low	Barthelmes and Brämick (2003); Arlinghaus and Mehner (2003)
Medium	5	France	Europe	Naturalized	Low	Indifferent	Low	Crivelli (1983); Poizat and Crivelli (1997)
Medium	5	Japan	Asia	Semi-native	Moderate	Positive	Moderate	Matsuzaki et al. (2007); Uchii et al. (2013)
Medium	5	Netherlands	Europe	Naturalized	Low	Indifferent	Low	ten Winkel and Meulemans (1984)
Medium	5	Nigeria	Africa	Alien	Low	Indifferent	None	Olaniyan (1961); Barker (1994)
Medium	5	United Kingdom	Europe	Naturalized	Low	Positive	Moderate	Britton et al. (2010); Copp et al. (2015a)
Medium	6	Nepal	Asia	Alien	Low	Indifferent	Low	Swar and Gurung (1988); Gurung (2007)
Medium	7	Argentina	South America	Alien	Moderate	Indifferent	Low	Fernández et al. (1998)
Medium	8	Kenya	Africa	Alien	Moderate	Indifferent	Moderate	Britton et al. (2007); Oyugi et al. (2014)
Medium	8	Mexico	North America	Alien	Moderate	Indifferent	Moderate	Tapia and Zambrano (2003); Zambrano et al. (2006)
Medium	8	Spain	Europe	Naturalized	High	Indifferent	Moderate	Almeida et al. (2013); Clavero and Villero (2014)
High	10	New Zealand	Australasia	Alien	Moderate	Negative	High	Hanchet (1990); Rowe (2007)
High	11	Australia	Australasia	Alien	High	Negative	High	Koehn (2004); Vilizzi and Copp (2013)
High	11	Canada	North America	Alien	High	Negative	High	McCrimmon (1968); Badiou and Goldsborough (2006)
High	11	United States	North America	Alien	High	Negative	High	Cahn (1929); Moyle (1984)

Selon le tableau 1, seulement un seul pays à un risque de zéro et il s'agit de la Hongrie. En effet c'est le seul pays où la carpe est native, elle n'est donc pas invasive et n'a pas d'effet sur le milieu. Nous pouvons constater que dans les pays où la carpe est naturalisée ou semi-native les impacts sont moins importants. De plus, la carpe à moins d'impact dans les pays d'Europe dans des régions tempérées que dans les pays qui sont relativement chaud comme l'Espagne, le Kenya, le Mexique, l'Australie, etc. Cependant, une étude doit être mise en place afin de confirmer cette hypothèse.

Les pays où l'impact est le plus important sont l'Australie, le Canada, et les États-Unis. En effet la carpe là-bas est un poisson étranger et possède une capacité d'invasion considérable donc un impact important. Le premier impact est l'augmentation de nutriments dans l'eau à cause de l'excrétion. De ce fait, on a une augmentation de la quantité de phytoplancton par l'augmentation d'azote et de phosphore (Koehn et al. 2000). Ainsi ce phénomène est responsable de blooms algaux qui entraînent des problèmes d'oxygénation. De plus, de par son comportement alimentaire et reproducteur, elle augmente la turbidité de l'eau et donc réduit la pénétration de la lumière, ce qui entraîne une diminution des macrophytes aquatiques et de la production primaire aquatique au fond de l'eau (Figure 4). Ainsi, avec ces impacts directs, on assiste à une diminution des habitats, des espèces de poissons naturellement présentes et de macroinvertébrés (Koehn et al. 2000).

La carpe se nourrit principalement de macrophytes aquatique de zooplancton et de macroinvertébrés aquatique entraînant un impact direct. Ainsi, elle rentre aussi en compétition avec

les espèces de poissons ayant le même mode alimentaire et ceux partageant les mêmes habitats. De plus, la carpe en se nourrissant peut manger des petits alevins, œufs et autres espèces aquatiques se trouvant sur le fond (Vilizzi et al. 2015).

D'après Marshall (2019), en Australie la carpe entraînerait une diminution de 47 à 68% de la biomasse des poissons natifs et elle serait aussi responsable de la disparition dans de nombreux endroits d'un petit coléoptère indigène (*N.sublineata*)

D'après Koehn (2000), la carpe peut être aussi un vecteur de maladie, en effet différents éléments pathogènes sont liés à la présence de carpes. Ceci inclut 226 maladies parasitaires et fongiques.

Ainsi, de par ses différents impacts directs et indirects sur les espèces aquatiques, la carpe entraîne des effets en cascade sur les autres espèces notamment les amphibiens et les oiseaux (Marshall et al. 2019). Les différents impacts sont résumés sous forme de schémas dans la partie résultat (Figure 4).

Les différents impacts de la carpe peuvent être résumés dans le tableau ci-dessous :

Impact de la carpe	
<u>Augmentation</u>	<u>Diminution</u>
Turbidité de l'eau	Biomasse et diversité des macrophytes
Du taux de nutriments dans l'eau	D'espèces de poissons et de macroinvertébrés (En nombre et en diversité)
De la concentration algale	Du gros zooplancton
Du phytoplancton	Amphibiens et oiseaux liés au milieu
Érosion des berges	

Cette image permet d'illustrer ces différents problèmes de façon visuelle :



Figure 3 : Illustration de l'impact avec carpe sur l'image de gauche, et sans carpe à droite (<https://www.carp.gov.au/the-carp-problem>)

À l'aide des différentes lectures d'articles sur l'impact de la carpe, trois schémas sont ressortis. Ensuite, à partir des différentes lectures, un schéma a été réalisé en essayant d'y inscrire le maximum d'informations.

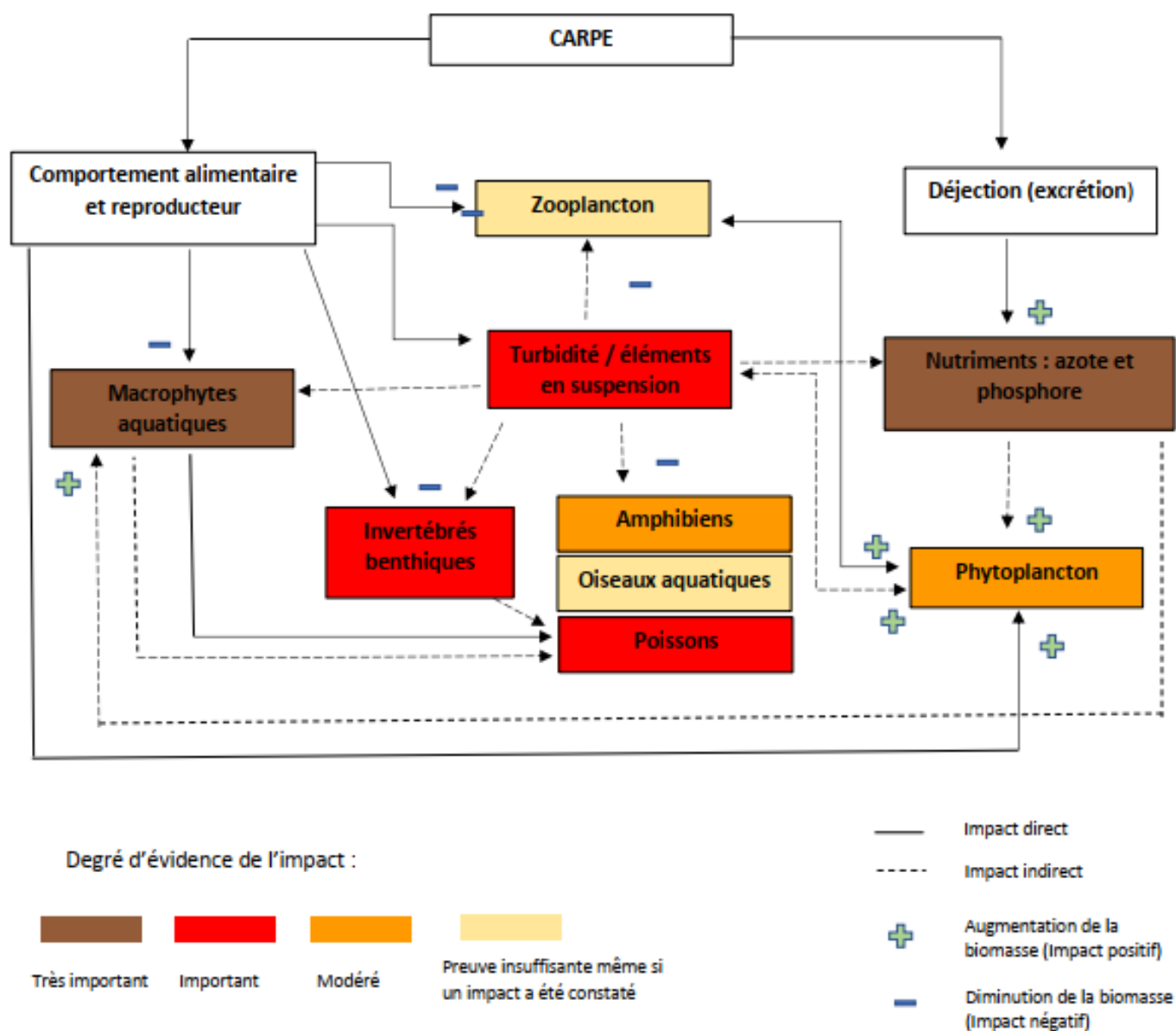


Figure 4 : Schéma modifié par Tanguy Grandmougin montrant l'impact de la carpe en eau douce d'après Vilizzi et al

Ainsi, les impacts sont résumés avec leur différent degré d'évidence basé sur 129 études faites en laboratoire et analysées par Vilizzi et al (2015). Plus ce degré est important et plus l'impact est avéré et prouvé par différentes études scientifiques.

Il est important de noter que la carpe est en constante augmentation dans différents pays d'introduction comme en Australie, ce qui intensifie les différents impacts. Il est donc nécessaire de faire des actions pour diminuer sa biomasse car les impacts environnementaux, sociaux et économiques peuvent être très importants (Koehn 2001).

Truite :

Concernant la truite fario, il existe beaucoup moins d'études que sur la carpe, ainsi la bibliographie est beaucoup moins importante. Il est vrai que les principaux impacts sont en Nouvelle Zélande car la biodiversité est assez pauvre. En effet d'après Townsend et al (1996), il y a seulement 27 espèces natives de poissons, donc le succès des truites peut être dû à des niches vides car elles ne rentrent pas dans un premier temps en compétition et peuvent se développer convenablement. De plus, la truite est un poisson prédateur qui est très compétitif envers les autres espèces, ainsi son impact est très important et elle entraîne même parfois l'extinction d'espèces natives comme *Prototroctes oxyrhynchus* (Townsend 1996).

Elle a été introduite à la fin du 19ème siècle et dans plusieurs régions comme l'Amérique du Nord, le Japon et quelques régions d'Europe, elle a un fort impact négatif sur les espèces de truite native de par la compétition, la prédation et l'hybridation (Carosi et al. 2020).

Prédation :

Il existe des pays dans lesquels l'impact de la truite est très important c'est le cas de la Nouvelle - Zélande, l'Australie et la Tasmanie. Dans ces pays la truite est un poisson très compétitif avec les autres espèces notamment les Galaxiidae (*Galaxias sp*) qui sont des espèces de poissons insectivores, car ils se nourrissent tous les deux d'invertébrés et donc partagent la même niche écologique. Ainsi la compétition est très importante. Avec l'âge, la truite devient majoritairement piscivore et une grande prédatrice pour les autres espèces. De ce fait, elle va avoir un impact direct important sur différentes espèces de poissons indigènes comme : *Prototroctes oxyrhynchus*, *Galacias sp vulgaris*, *Galaxias brevipinnis*. Elle entraîne même parfois l'extinction d'espèces natives comme *Prototroctes oxyrhynchus* (Townsend 1996).

En effet, d'après Townsend et al (1996), en conditions expérimentales (laboratoire), les truites se nourrissaient surtout de jeunes Galaxiidae et ce, jusqu'à 135 alevins par jour et par truite. De plus, différentes études montrent aussi que la truite aurait un impact direct sur une espèce d'écrevisse (*Paranephrops spp.*). En effet, ces invertébrés sont difficilement trouvables dans les rivières où la truite est présente et bientôt elles seront juste présentes dans des lieux où il y a une absence de truite.

De par son alimentation, la truite a aussi un impact direct sur les populations de macroinvertébrés brouteurs (*Ameletopsis*, *Orniscigaster*, *Nesameletus*). En effet, dans les rivières avec la présence de truites, les densités de macroinvertébrés étaient beaucoup plus faibles qu'en l'absence de ce poisson. Par conséquent, la réduction de la densité d'insectes brouteurs entraîne le développement de différentes algues. De par ce phénomène, toutes les algues ne sont pas consommées, celles-ci vont donc descendre à l'aval et impacter les communautés aval aussi (Townsend 1996).

Compétition :

De plus, d'après Flecker et Townsend (1994), certaines expériences ont montré qu'en présence de truites, il y avait aussi un changement de comportements des Galaxiidae et de certaines espèces de macroinvertébrés brouteurs. En effet, la truite rentre en compétition avec les Galaxiidae, ce qui entraîne une migration de ces espèces dans des lieux où la truite ne peut pas aller, comme au-dessus de cascades avec des hauteurs importantes. Il y a aussi un changement dans leur comportement alimentaire, car ils passent moins de temps à se nourrir de macroinvertébrés et ils ont beaucoup moins de succès dans la prédation d'insectes (Flecker et Townsend 1994).

De par son important impact avec la prédation et la compétition, la truite entraîne une fragmentation de la distribution des espèces natives. La plupart des espèces sensibles sont absentes là où la truite est présente (Cambray 2003). Aux USA, la truite va aussi avoir les mêmes impacts notamment sur la truite fardée (*Oncorhynchus clarkii*), et comme les Galaxiidae, elles ne sont retrouvées que dans des endroits très difficiles d'accès (P. Budy et Gaeta 2017). Il y a donc un déplacement des poissons natifs quand la truite est présente.

Autres impacts :

Il existe des impacts indirects de la truite. En effet, la truite fario pond ses œufs en automne alors que les truites natives des USA pondent aux printemps. Ainsi, les œufs vont éclore aux printemps pour les truites fario et en été pour les truites natives. De ce fait, les alevins de truites invasives auront un avantage sur les truites natives et cette taille plus importante intensifie la prédation et la compétition entre elles (P. Budy et Gaeta 2017).

Il y a aussi un changement de comportement notable chez les macroinvertébrés brouteurs. Des expériences en laboratoire ont montré que les éphémères (*Nesameletus ornatus*) passent moins de temps à brouter les algues en présence de truites (Flecker et Townsend 1994). La biomasse algale augmente dans certains endroits et affectent d'autres espèces aquatiques (figure 5).

Les truites vont avoir aussi des impacts différents selon les pays mais il est vrai qu'elle peut aussi avoir un impact en Europe notamment sur les truites natives. En effet, en Italie, l'hybridation avec la truite atlantique (espèce exotique envahissante) représente l'une des principales menaces pour les truites méditerranéennes natives (Carosi, Bonomo, et Lorenzoni 2020). À travers les différentes lectures bibliographiques, un schéma des différents impacts de la truite a été réalisé (Figure 5).

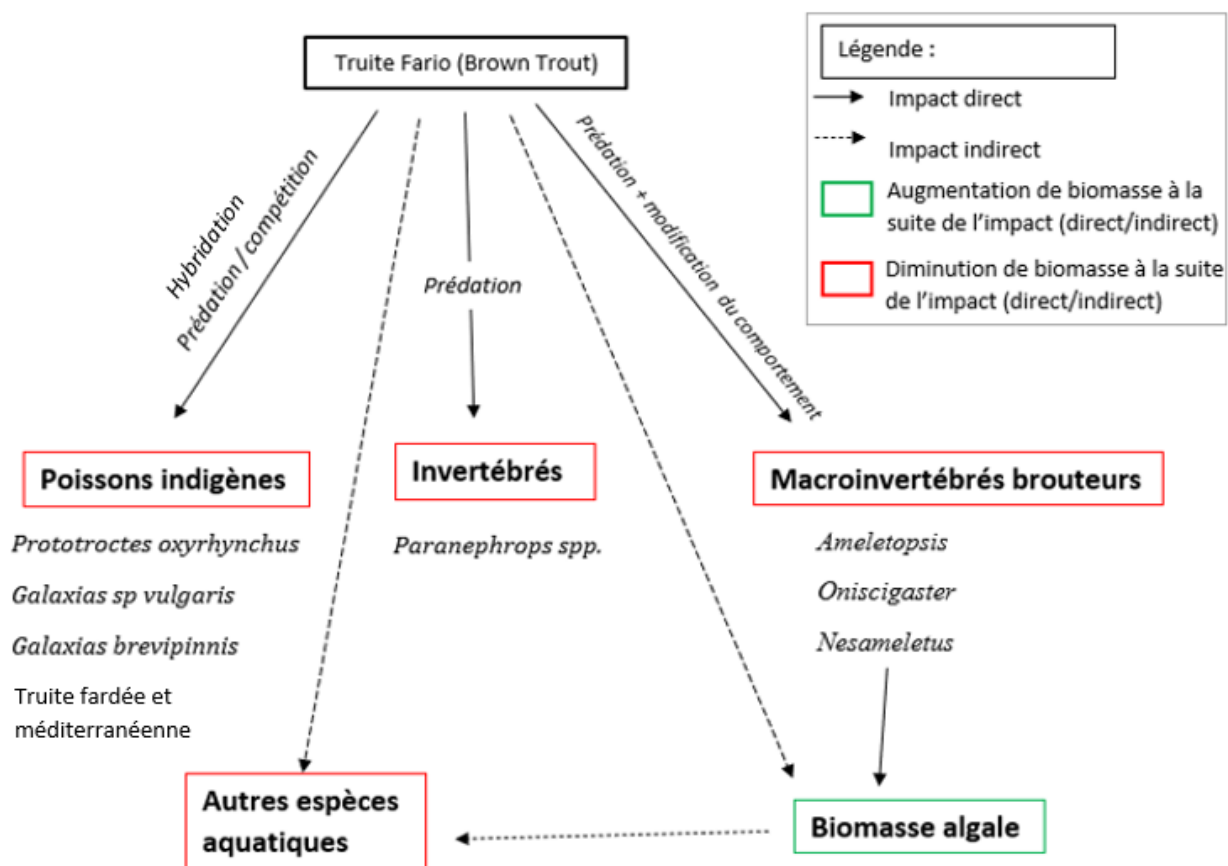


Figure 5 : Schéma récapitulatif des différents impacts de la truite fario (Auteur : Tanguy Grandmougin). D'après (Carosi, Bonomo, et Lorenzoni 2020), (Townsend 1996) (P. E. Budy et al. 2020).

Ainsi, les impacts de la truite et de la carpe sont très importants comme le témoigne ces différents schémas. C'est pour cette raison que la suite de ce PFE sera basée sur les méthodes pour évaluer et réduire l'impact de ces deux espèces.

Mesure de l'impact de la carpe

Il est important de mesurer l'impact de la carpe afin de pouvoir ensuite agir convenablement et ne pas perdre de l'argent et du temps inutilement.

L'évaluation de l'impact de la carpe peut se faire en comparant les variables environnementales entre les habitats avec une grosse densité de carpe et des habitats dans lesquels la carpe est exclue. Les sites doivent être choisis judicieusement afin d'éliminer les autres sources de perturbations. Le principe consiste à clôturer des habitats à l'aide d'un filet à maille fine afin d'exclure la carpe. Ainsi les comparaisons dans le temps des conditions de l'habitat entre des zones d'exclusion et de non-exclusion de la carpe dans des milieux proches peuvent permettre d'estimer les changements directement attribuables à la carpe. C'est le principe de la **Méthode BACI** (Before, After, Control, Impact). Ainsi, le but de cette méthode est de suivre dans le temps et l'espace la dynamique d'une ou plusieurs populations avant et après l'occurrence d'un événement potentiellement impactant (Koehn et al. 2000).

Cette méthode est une méthode d'exclusion comme vu précédemment car elle permet de voir les différences entre site avec carpe (impact) et sans carpe (contrôle). En conditions idéales il y aurait peu de différence entre les sites BC (sans carpe) et BI (avant impact) et peu de différence de temps entre BC (sans carpe) et AC (avec carpe) (Figure 6). Si les changements entre BI (avant impact mais carpe présente) et AI (après impact) ou entre AC et AI sont plus importants que les changements entre BC et BI ou BC et AC, alors un impact causé par la carpe est détecté.

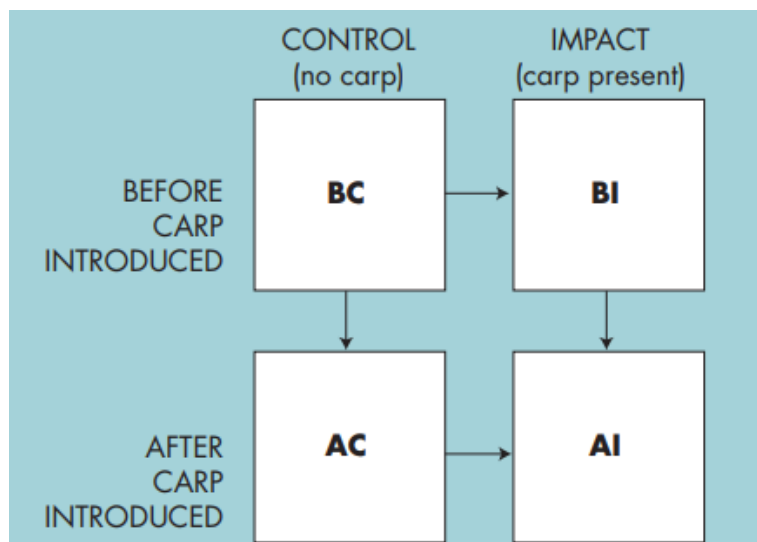


Figure 6 : Méthode BACI (Koehn and al). Les flèches indiquent la direction du changement ou l'échelle temporelle (avant après).

La méthode d'exclusion peut se faire aussi à partir de barrages, et donc exclure les carpes dans certains endroits. Cependant, cette méthode présente un inconvénient potentiel : en excluant la carpe, d'autres poissons et animaux peuvent également être exclus, ce qui peut entraîner d'autres changements qui ne sont pas causés par la carpe. Malgré cela, de grandes différences en termes de qualité d'eau ont été constatées sur les sédiments en suspension et la croissance de la végétation aquatique dans les conditions d'exclusions de la carpe.

Limite de la méthode BACI : Comme vu ci-dessus, en excluant la carpe, on exclut aussi bien souvent d'autres espèces qui sont nécessaires au bon fonctionnement de l'écosystème. Un autre problème dans l'évaluation de l'impact de la carpe en rivière est que la carpe peut bouger sur de longue distance à la différence d'une eau close avec une population fermée.

En effet, les carpes en rivières peuvent bouger pour s'alimenter, se reproduire ou tout simplement pour d'autres raisons. Donc les populations des différents sites de mesures peuvent varier suivant la période. De plus, il est souvent impossible d'étudier les conditions des habitats avant l'implantation des carpes. Dans ce cas, même si des résultats ont prouvé qu'il existe bien une différence pouvant être détectée entre les zones d'exclusion et de non exclusion, il peut être difficile d'attribuer ces changements qu'à la carpe à moins que le nombre de carpes dans la zone de non-exclusion soit connu en même temps.

Si les sites de contrôle sans carpe sont fondamentalement différents des sites avec la carpe, la comparaison entre les sites est sans signification par rapport aux impacts de carpes. C'est pour ces raisons, que pour la méthode BACI il serait donc judicieux de faire des études dans des zones où la carpe n'est pas encore présente et où l'on pourrait s'attendre à ce qu'elle apparaisse d'ici quelques années.

Une autre méthode alternative pour détecter l'impact de la carpe est la **méthode Recovery**. Plutôt que d'essayer de détecter l'impact de perturbation de la carpe, cette méthode enlève la source de perturbation qui est la carpe et l'étude se concentre sur la détection de la récupération de l'écosystème après une perturbation. En résumé, on a déjà la carpe présente dans le milieu puis on va l'enlever pour voir comment se « régénère » le système (figure 7).

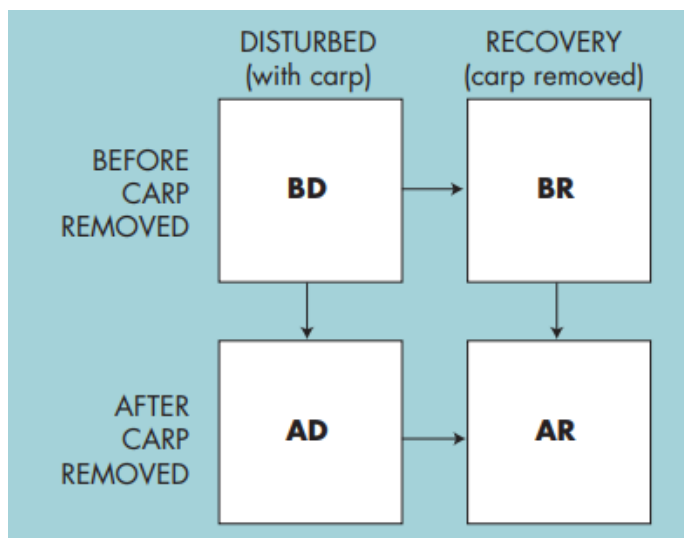


Figure 7 : Méthode Recovery (Koehn and al). Les flèches indiquent la direction du changement ou l'échelle temporelle (avant après).

Cette forme d'évaluation comporte peu de contrainte et a été utilisée avec succès en Australie.

La méthode Recovery utilise la même conception que la méthode BACI (figure 6), mais elle utilise des sites témoins avec des carpes déjà présentes et des sites d'impact dans lesquels les carpes sont enlevées. La capacité de détecter l'impact ou la récupération est grandement améliorée en augmentant le nombre de sites et le nombre d'échantillonnages avant et après le retrait de la carpe. D'après Koehn, cette méthode est plus adaptée pour définir l'impact de la carpe que la méthode

BACI et est particulièrement utile pour démontrer les avantages des mesures de gestion visant à réduire la carpe.

Limite de la méthode Recovery : Cependant, il y a une distinction entre l'impact de la carpe et l'impact mesuré avec la méthode Recovery. Les changements survenant après son extraction du milieu, ne sont pas nécessairement liés qu'à son absence. En effet, il existe une variabilité environnementale et d'autres formes de perturbation qui peuvent survenir après extraction des carpes et donc qui vont commencer déjà à changer les conditions du milieu.

C'est pour ces différentes limites et difficultés à détecter l'impact de la carpe qu'il est recommandé de faire appel à des professionnels spécialisés dans ce domaine spécifique avant d'entreprendre différents travaux.

Lors de l'application de ces méthodes, c'est principalement la qualité de l'eau qui va être mesurée car l'impact principal de la carpe est qu'elle augmente la turbidité. La turbidité peut être mesurée avec un compteur électronique. Deux mesures sont nécessaires : les sédiments mis en suspension lorsque la carpe se nourrit et la turbidité algale lorsque la carpe rejette des nutriments. Cependant, la turbidité dépend de nombreux facteurs et peut varier suivant la localisation et le temps.

De plus, d'autres facteurs sont mesurés afin de voir l'impact de la carpe (tableau 2). En effet, sont mesurés : les dépôts de sédiments, le taux de phosphore disponible, des changements dans la densité des macrophytes et même les lésions externes sur les poissons natifs. Cependant d'autres facteurs sont mesurés comme l'érosion des berges et peuvent être associés à une densité de carpe très importante. Ces résultats ne peuvent être établis qu'en conditions expérimentales contrôlées (étangs, milieu fermé) car en milieu ouvert l'impact est beaucoup plus difficile à évaluer. En conséquence, l'impact véritable des carpes en milieu naturel sera toujours difficile à évaluer.

Dans une étude sur l'impact de la carpe en Australie (Marshall et al. 2019), une méthode d'exclusion est utilisée. C'est-à-dire que la réponse de différents facteurs va être testée avec la présence de carpe et en son absence.

Tableau 2 : résumé des différents tests et méthodes utilisés pour quantifier l'impact de la carpe sur ces différents facteurs (Marshall et al. 2019)

Facteurs	Méthodes et tests utilisés
Ecosystèmes (comparaison des réponses des variables ci-dessous)	Comparaison sur R studio d'un bassin versant avec carpe comparé avec un bassin versant sans carpe. Test sur R.
Macroinvertébrés (métriques, richesse, assemblage)	Comparaison d'un bassin versant avec et sans carpe. Métrique : t-test Richesse : modèle linéaire avec une distribution Poisson. Assemblage : analyse multivariée
<i>N.sublineata</i> (Coléoptère)	Comparaison d'un bassin versant avec et sans carpe. (T-test)
Macrophyte	Test de Fisher afin de tester si la proportion de macrophytes observés sur les sites était plus importante avec ou sans carpe.
Turbidité	Test de l'hypothèse : la turbidité est plus élevée dans les sites avec carpes que ceux sans. (t-test)
Poissons indigènes :	Comparaison des métriques des poissons sur un bassin versant avec et un autre sans carpe. (t-test)

Ces deux méthodes pour évaluer l'impact de la carpe semblent être les seules utilisées. Cependant, aucune étude ne prouve leur pourcentage d'utilisation et d'efficacité.

Méthode pour réduire l'impact de la carpe

La gestion des impacts de la carpe se base sur deux grands principes : le contrôle des populations (méthode directe) ou la réduction des impacts en jouant sur différents facteurs environnementaux (méthode indirecte).

Les méthodes directes :

Il existe de nombreuses méthodes pour contrôler de manière directe les populations de carpe :

La pêche de loisir ou professionnelle

La pêche, dans toutes ses formes (loisir ou professionnelle), est l'une des meilleures méthodes pour réduire l'abondance des poissons (Koehn et al. 2000). De nombreuses études montrent qu'une pêche intensive peut faire diminuer de manière considérable certaines espèces de poissons (Colvin M.E et al. 2012). Cependant la carpe est un poisson qui peut vivre dans n'importe quel plan d'eau et de toutes tailles (lacs, rivières), ainsi la pêche commerciale peut avoir un impact mais certaines zones restent préservées du fait qu'elles sont inaccessibles (Roberts et al. 1997). Il est vrai que dans certains milieux, il est difficile d'arriver à contrôler la population des carpes car pour la pêche commerciale, le marché n'existe pas ou les prix sont très bas (Colvin M.E et al. 2012). En effet, une étude produite dans le lac Gippsland n'a pas montré de réduction apparente de biomasse de la carpe (Koehn et al. 2000).

Le drainage ou abaissement du niveau d'eau

Une autre technique pour enlever les carpes est de drainer et d'assécher les habitats isolés. Il est vrai qu'il a été démontré que les carpes sont moins aptes à retourner dans la rivière après une crue que les autres poissons (Koehn et Nicol 1998). Ainsi, de nombreuses carpes sont bloquées dans des petits plans d'eau ou ruisseau à la suite de crues, et en asséchant ces zones, les populations de carpes diminuent (Koehn et al. 2000).

Une autre méthode directe est d'abaisser le niveau d'eau dans différents lacs et étangs pour que les carpes n'aient pas accès aux bordures avec de la végétation afin d'y pondre. Cette approche a été particulièrement réussie en Tasmanie même si les données ne sont pas encore toutes disponibles (Lintermans 2004).

La chimie

Certains poisons peuvent être utilisés. Il est très courant d'utiliser des substances chimiques pour diminuer les populations d'espèces invasives mais plutôt terrestres. En effet, en milieu aquatique, l'utilisation de poison peut être très dangereux à cause de la dissémination dans l'eau et le risque de toucher beaucoup d'espèces est très important.

Cependant, différents tests ont prouvé que les carpes peuvent être éradiquées avec succès dans des zones isolées en utilisant des produits chimiques. D'autres espèces invasives comme la perche (*Perca fluviatilis*), la truite fario (*Salmo trutta*), et la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) ont été éradiquées de certaines zones grâce aux produits chimiques (Roberts et al. 1997).

Différents produits sont disponibles pour empoisonner les carpes, le plus connu et le plus efficace est la roténone : c'est un composé produit à partir de différentes racines de plantes comme la Derris root (*Derris spp.*). La roténone peut être appliquée par injection directement dans l'eau ou dans des

appâts. Ce produit, empêche l'oxygène d'aller dans les tissus et le poisson meurt par suffocation. Cependant c'est un piscicide non sélectif donc il existe des dommages collatéraux élevés.

D'autres produits peuvent être utilisés comme l'Antimycin et l'Acrolein. Cependant ces produits peuvent avoir des effets plus ou moins néfastes sur les populations indigènes ce qui pose d'importants problèmes quant à leur utilisation.

Virus de contrôle, le SVCV (Spring Viraemia Carp Virus)

Les effets de ce virus sont bien connus en Europe, Amérique et Asie pour entraîner la mort chez de nombreuses espèces de cyprinidés (Roberts 1994). Ce virus se développe quand la température de l'eau se situe entre 10 et 15 degrés juste après l'hiver et il est d'autant plus efficace quand les conditions de stress sont importantes. Cependant, en Australie, les conditions environnementales ne semblent pas correspondre pour un bon développement du virus car les changements de températures durant les saisons sont faibles, il fait chaud durant une longue partie de l'année (Roberts et al. 1997). Cependant, le virus peut être intéressant pour réguler l'impact des carpes dans les pays qui ont ces conditions particulières. De plus c'est une méthode peu coûteuse mais les effets secondaires sur d'autres espèces restent à déterminer et à prendre en compte avant l'utilisation de cette méthode (Koehn et al. 2000).

Le contrôle par immuno-contraception

Un antigène va induire une réponse immunitaire qui va affecter la fertilité des carpes afin de réduire l'abondance des carpes à un seuil où l'impact est faible. Ces méthodes sont encore en développement, mais le but est de produire un agent qui rend infertile une espèce spécifique de manière significative sans avoir d'effet sur les autres espèces. Ainsi cet antigène peut être couplé avec le virus SVCV pour avoir un impact encore plus important qui va entraîner la mort et le contrôle de la fertilité. Ces différents pathogènes peuvent être délivrés dans la nourriture des carpes afin qu'ils soient ingérés. Cependant ce sont des OGM (Organismes Génétiquement Modifiés), donc une question éthique et environnementale se pose derrière ces pratiques (Koehn et al. 2000).

Carp Exclusion Screens (CES)

Il faut savoir que les zones humides sont les lieux de reproduction de la carpe. En Australie, plus de 98% des carpes sont produites dans les zones humides connectées à la rivière principale (Hillyard et al. 2010). De ce fait pour limiter la reproduction des carpes, des barrières grillagées appelées CES (Carp Exclusion Screens) sont installées aux entrées des zones humides pour exclure les gros sujets (Figure 8). Cependant, des études sont actuellement en cours pour valider l'efficacité des CES dans la gestion de l'impact de carpe. Il existe de nombreuses préoccupations sur les effets néfastes possibles sur la faune aquatique indigène car ce sont des lieux de reproduction. Un CES optimisé peut permettre un contrôle localisé de la carpe sans restreindre le passage de certains poissons indigènes clés (Hillyard et al. 2010).



Figure 8 : Photo de la barrière grillagée (CES) pour empêcher les carpes d'atteindre la zone de reproduction
<http://www.fishfiles.com.au/Media/FISH-Magazine/FISH-Vol-25-3/Tar-Rus-native-nursery-trial>

Méthode indirecte :

Les stratégies axées sur la réduction d'impact peuvent s'avérer plus efficaces et plus économiques sur le long terme que l'élimination de la carpe par un contrôle direct des populations. En effet, les méthodes directes permettent de réduire grandement les populations mais très difficilement d'en arriver à bout (Koehn et al. 2000).

Ainsi, comme méthode indirecte, la restauration des processus écologiques dans les milieux aquatiques semble être la plus efficace. En effet, de nombreux lacs et rivières ont été perturbés et les populations piscicoles aussi. Il est vrai que les perturbations environnementales d'un milieu est l'une des principales causes qui facilite l'implantation de nouvelles espèces invasives (Moyle et Light 1996).

Restauration de cours d'eau :

Les perturbations des milieux aquatiques sont nombreuses : pollutions toxiques, augmentation de la température de l'eau, dégradation des habitats et de la qualité de l'eau, les barrages, et des débits contrôlés.

Toutes ces perturbations vont fragiliser le milieu et notamment la faune aquatique, ce qui va être favorable à l'implantation de nouvelles espèces (Roberts et al. 1997). Les différentes solutions et techniques de restauration visent à restaurer différents domaines : la structure des habitats, les berges, le type de substrat, le régime hydraulique, la flore et faune aquatique, la végétation riparienne et la connectivité entre différents habitats. Ainsi, rétablir ces différents paramètres aura pour but de diminuer les densités de carpe de manière indirecte en jouant sur la capacité de résilience d'un écosystème face à une invasion.

Plusieurs volets se sont montrés favorables à la régulation des populations de carpes notamment en restaurant des débits naturels, en améliorant la qualité d'eau et la continuité écologique. En effet dans les différents endroits où la carpe a des effets désastreux, il y a bien souvent une modification du cours d'eau par les activités anthropiques ce qui le fragilise et permet le développement d'espèces invasives (Roberts et al. 1997).

-Débits :

En effet, des études ont prouvé que lorsque les conditions naturelles des cours d'eau étaient retrouvées, il y avait des effets significatifs sur la densité de carpe (Roberts et al. 1997).

Le débit est un facteur clé car il permet de d'intervenir sur la reproduction des carpes. Pour fournir de l'eau à des fins anthropiques (agricultures, villes), différents aménagements ont été réalisés sur les cours d'eau et ont réduit la variabilité naturelle des débits entraînant une chute de la diversité des habitats. Ainsi, la réduction d'habitat augmente l'impact des espèces invasives alors que des débits changeants au cours de l'année créent une diversité d'habitats qui vont accueillir une plus grande diversité. Par exemple, une étude a été réalisée sur 4 bassins versants différents afin de voir comment le débit influence la diversité des espèces et l'abondance des carpes (Figure 9). Par exemple, dans le Murray River, les conditions sont extrêmement stables avec une très faible variabilité du débit alors que le Paroo a très peu de régularisation donc des périodes de sécheresses et d'inondations (Figure 9).

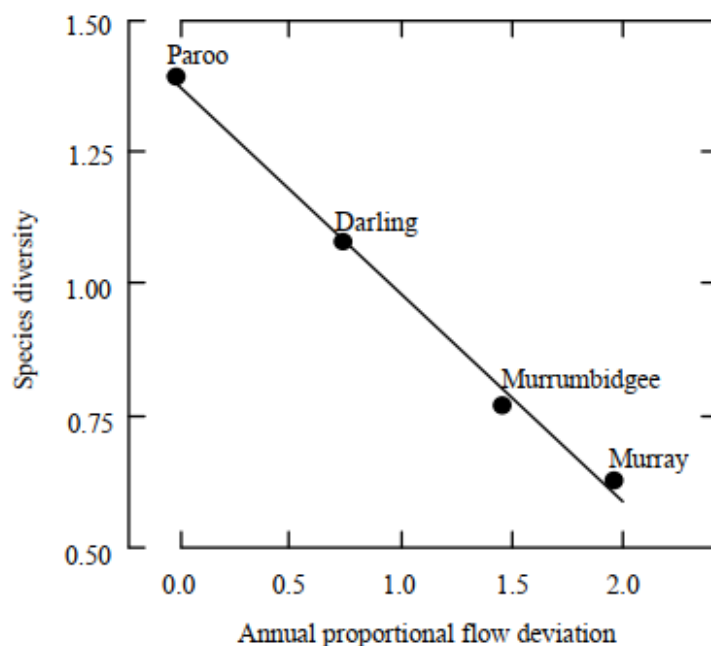


Figure 9: Graphique représentant la diversité d'espèce en fonction de la régulation du débit (Roberts et al. 1997)

Ainsi, une plus grande diversité d'espèce est présente quand la régulation des débits est faible (Paroo, Figure 9).

Les changements de régime hydraulique sont causés par des prélèvements d'eau, une suppression des crues, une stabilisation des débits pour permettre une irrigation. Ainsi, les différentes rivières régulées en Australie ont des niveaux d'eau qui sont hauts durant la période de reproduction de la

carpe, ce qui permet à celle-ci d'entrer dans les plaines d'inondations afin de s'y reproduire. En augmentant la variabilité des débits, l'accès aux plaines d'inondations sera restreint pour les carpes, ainsi les juvéniles auront moins de chance de survivre et simultanément l'impact des carpes sera réduit sur ces habitats (Roberts et al. 1997).

-Pollution :

La carpe est un poisson polluo-tolérant c'est-à-dire qu'elle a une capacité supérieure à supporter les pollutions par rapport aux espèces natives. Dans ces eaux polluées, la physiologie, et le comportement des poissons indigènes sont affectés et la carpe peut coloniser de manière plus intense les milieux. Ainsi, il est important de lutter contre la pollution et de restaurer les milieux (Roberts et al. 1997).

-La structure des habitats :

La perte de végétation riparienne et aquatique, la perte d'habitat, et la modification du chenal entraînent une augmentation de la biomasse de carpe (Roberts et al. 1997). En effet, ces changements affectent en particulier les espèces indigènes et donc crée des opportunités pour les poissons plus tolérants et invasifs comme la carpe. Ainsi, différents projets sont mis en place pour contrôler l'érosion et l'envasement des rivières, remettre des habitats (bois morts) et pour limiter le pâturage des bêtes sur les berges par des clôtures. Tous ces projets contribuent grandement à restaurer les habitats des cours d'eau et donc les populations indigènes.

-Connectivité :

La connectivité longitudinale entre l'amont de la rivière et l'aval et la connectivité latérale entre la rivière et les plaines d'inondations ont été interrompues dans de nombreuses rivières à cause d'aménagements anthropiques (Roberts et al. 1997). En effet, les barrages et les seuils empêchent la migration des poissons et des sédiments. Par exemple, il y a plus de 3000 barrages dans le New South Wales (Etat Australien). La connectivité latérale a été supprimée par la construction de levées, de digues et de berges en béton ce qui a modifié les écoulements dans les plaines inondables. Différentes études ont montré que la carpe est favorisée lorsque la connectivité est faible car son exigence en termes d'habitat pour la reproduction est moins stricte que les espèces indigènes (Harris et Mallen-Cooper 1994). De plus, la carpe réussit souvent plus facilement à franchir les barrières physiques affectant la migration vers l'amont des espèces indigènes. En effet, elle possède la particularité à cause de son comportement « migrateur ». De plus, certaines pratiques humaines introduisent des carpes dans des endroits non colonisés. Ainsi pour lutter contre la colonisation de la carpe, il faut contrôler ces pratiques d'introduction illégales et mettre en place de nombreuses passes à poissons qui soient efficaces.

Passe à poisson (méthode directe et indirect)

Les passes à poisson permettent au poisson de franchir une barrière qui bloque leurs mouvements vers l'amont de la rivière.

Il existe différentes passes à poisson mais la plus utilisée reste la passe à poisson à fente verticale. L'eau descend de bassin en bassin et les poissons peuvent remonter la pente.

En effet, les passes à poissons peuvent réduire l'impact de la carpe en permettant aux espèces natives d'avoir accès aux habitats dans lesquels elles étaient en déclin. De plus, le mouvement est essentiel pour les espèces de poissons pour se nourrir ou même effectuer une migration. Un grand nombre de poissons a été reporté comme utilisant les passes à poissons, incluant la carpe (Mallen-

Cooper 1996). Il est vrai que permettre la libre circulation des poissons permet une meilleure répartition des espèces, de réduire le pouvoir de compétition de la carpe sur les différents habitats et aussi d'augmenter la pression de prédation sur celle-ci.

Cependant, les passes à poissons peuvent aussi entraîner une dispersion de la carpe et donc une colonisation de nouveaux habitats. Toutefois, la remontée des carpes à travers les passes à poisson peut être limitée en installant des trappes qui vont piéger les poissons (Stuart et al. 2011). Ainsi les carpes capturées seront détruites pendant que les poissons natifs seront remis à l'eau. Ce système peut être automatisé en utilisant un appareil électronique qui distingue la carpe des autres poissons mais plus de recherche sont nécessaires pour développer ce genre de prototype (Stuart et al. 2011).

Il existe une autre méthode qui permet de trier la carpe des autres poissons au niveau des passes à poissons et qui peut être intéressante pour contrôler la dispersion et l'abondance de la carpe. En effet, la carpe possède une particularité, c'est qu'elle a le réflexe de sauter en dehors de l'eau lorsque qu'elle est prise dans un piège. Tous les autres poissons natifs d'Australie n'ont pas ce comportement. Ainsi les chercheurs ont décidé d'appliquer une cage en jouant sur ce principe. Cette case s'appelle la « William Cage » et permet de séparer automatiquement les carpes des autres poissons non sautants (Stuart et al. 2011) (figures 10 et 11).

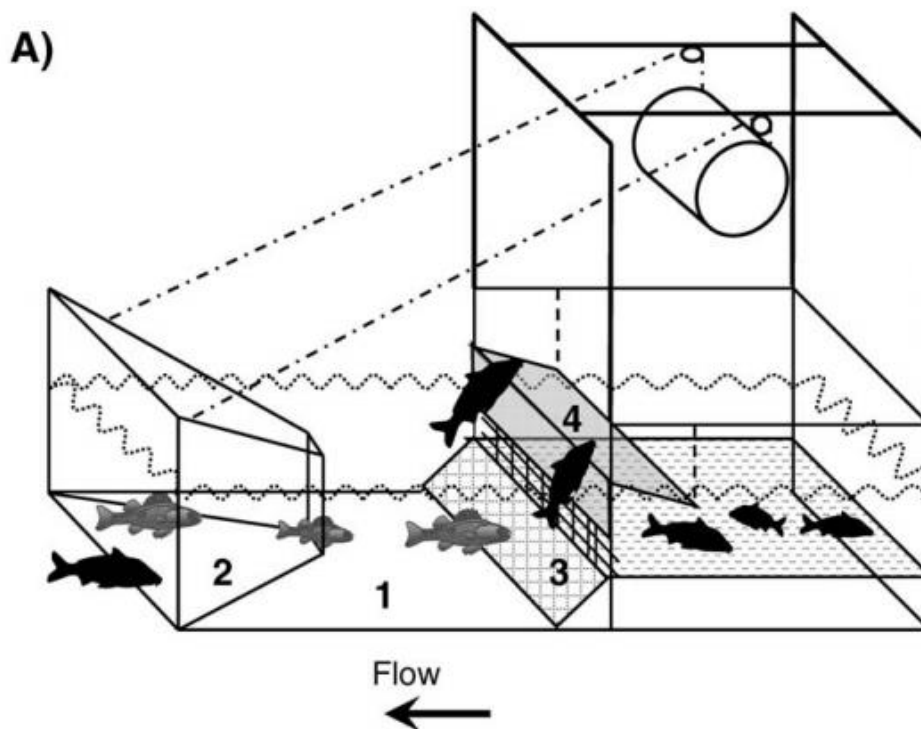


Figure 10: William Cage : Cage permettant de séparer les carpes (poisson noir) des autres poissons (gris) (Stuart et al. 2011)

Ainsi comme le montre la figure 11, les carpes vont sauter dans une trappe.

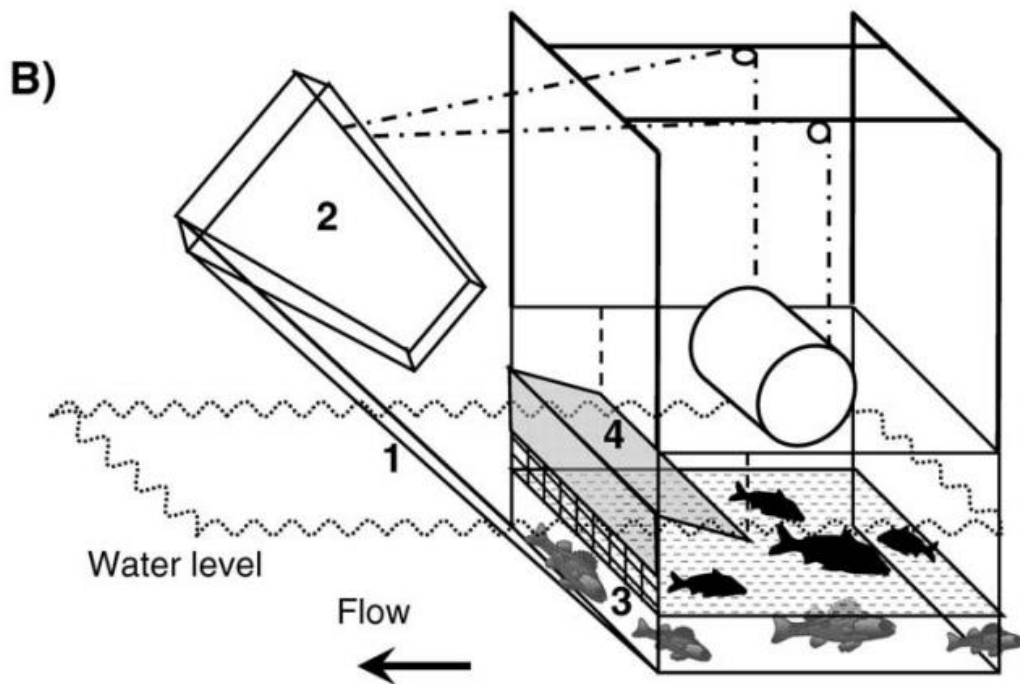


Figure 11: "William Cage"(Stuart et al. 2011)

Les poissons sont ensuite comptés toutes les 24h et d'après les différents relevés, 88% des carpes ont sauté dans la trappe alors que les autres espèces n'ont pas été retrouvées ou dans un nombre très faible (0,06% pour la Golden perch (*Macquaria ambigua*) ou 1,3% pour le Bony berring) (Stuart et al. 2011). Puis la cage est remontée afin de laisser les espèces natives continuer leur chemin (Figure 11).

Ne rien faire : Quelque fois ne rien faire peut-être plus avantageux en prenant en compte les bénéfices et les risques quand on agit sur différents facteurs. En effet, il existe des cas particuliers où mettre en place une stratégie de régulation peut avoir des effets collatéraux encore plus dévastateur que le véritable problème.

Afin de résumer au mieux les différentes méthodes pour réduire l'impact de la carpe et ensuite pouvoir les comparer avec la truite, un tableau récapitulatif des avantages et inconvénients pour chaque espèce a été réalisé (tableaux 3 et 4 pour la carpe).

Tableau 3 : Les différentes méthodes directes pour réduire l'impact de la carpe

Méthodes directes pour réduire l'impact des carpes		
Méthodes :	Avantages	Inconvénients
La pêche (loisir et professionnelle) (Koehn et al. 2000)	Technique la plus utilisée. Très bonne efficacité sur toutes les espèces de poissons. Avantage économique (source de nourriture).	Technique très efficace à petite échelle mais pas à grande échelle. En effet, les carpes peuvent être pêchées que dans des zones « pêchables », il existe des zones reculées où les carpes ne sont pas accessibles. Ainsi l'effet à large échelle est faible (étude Gisspland : montrant que la pêche n'a pas d'effet important sur la réduction des biomasses de carpes).
Drainage (Roberts et al. 1997)	Très efficace en Tasmanie et peu couteux.	En phase d'expérimentation, aucune étude ne prouve son efficacité pour l'instant.
Chimie (sur des appâts à carpe ou dans des zones isolés) (Koehn et al. 2000) (Roberts et al. 1997)	L'une des méthodes les plus efficaces quand les carpes sont dans des habitats localisés. Efficacité et rapide.	Prix importants Toxique : impact sur les autres espèces. Importance de faire des contrôles de suivi. Encore en phase d'essai, il faudrait une meilleure connaissance pour ne pas affecter les autres espèces de poissons Impact sur le long terme : Les produits chimiques peuvent être stockés dans les sédiments puis remobilisés lorsque la carpe vient se nourrir sur le fond.
Immuno-contraception (Koehn et al. 2000)	Efficacité importante sur certaines espèces. Peu couteux.	Problème éthique et environnementaux, utilisation d'OGM. Encore en phase de test. Risques sur d'autres espèces. Effets secondaires encore inconnus
Virus (« Spring Viraemia of Carp Virus - an overview ScienceDirect Topics » s. d.). (Roberts 1994) (Koehn et al. 2000)	Peu couteux et efficacité importante dans certaines conditions.	Les effets du SVCV sur les carpes dans certains écosystèmes comme l'Australie ne sont pas encore connu. Aucune connaissance sur la transmission des virus Problème éthique, et environnementaux. Risque sur d'autres espèces.
CES (Carp Exclusion Screens) (Hillyard et al. 2010)	Peu couteux, et respectueux de l'environnement.	Aucune étude prouve son efficacité encore. L'écran peut prévenir le passage des carpes adultes dans certaines zones mais pas des œufs, larves et juvéniles. D'autres options peuvent être ajoutées à l'écran pour qu'il soit plus efficace comme des sons ou une barrière électrique mais tout ceci est encore en phase d'expérimentation. Effet important sur les poissons se reproduisant dans les mêmes zones que les carpes.

Tableau 4 : Les différentes méthodes indirectes pour réduire l'impact de la carpe

Méthodes Indirectes pour réduire l'impact des carpes		
Méthodes :	Avantages	Inconvénients
Restauration de cours d'eau : -Débits -Pollution -Structure des habitats -Connectivité (Roberts et al. 1997) (Koehn et al. 2000) (Koehn 2001)	Impact sur toutes les formes de vie. Améliore la qualité de l'eau, des habitats. Intérêts biologiques : amélioration des populations indigènes qui vont exercer une régulation des populations de carpes (compétition, prédation) Très efficace pour retrouver des milieux en bonne santé et donc limiter les populations de carpes.	Méthode couteuse (fonds limités) Effets sur le long terme.
Passe à poissons (Stuart et al. 2011)	Améliore la continuité écologique (permet la libre circulation des poissons). Une meilleure répartition des espèces. Réduire le pouvoir de compétition de la carpe sur les différents habitats. Efficace sur la carpe grâce à la William Cage (Figure 10 et 11).	Dispersion de la carpe. Coût économique et humain. Efficacité sur le long terme qui reste à prouver.
Ne rien faire (Roberts et al. 1997)	Aucun coût. Aucun contrôle. Permet de laisser la nature travailler afin de retrouver un équilibre.	Développement anarchique Conséquences sanitaires, écologiques et économiques.

La méthode de restauration de cours d'eau semble être une méthode très prometteuse d'après Roberts (1997). Des efforts sont réalisés, cependant, l'intégration de tous les paramètres et le financement de ce genre d'opération reste très limité. D'autres études et efforts sont attendus (Roberts et al. 1997).

Mesure de l'impact de la truite (*Salmo Trutta*)

La truite fario (*Salmo trutta*) fait partie des 100 espèces les plus invasives. Elle entraîne bien souvent un impact négatif sur les populations de truites natives de par une importante compétition, prédation et une hybridation (cf partie impact de la truite). Les espèces de truites natives comme la truite fardée ont besoin d'une eau à température très fraîche et de bonne qualité et de ruisseaux connectés afin de pouvoir s'y reproduire et grandir (P. Budy et Gaeta 2017). L'augmentation de la température de l'eau des rivières et la diminution des débits ont permis aux truites non natives (truite fario) de migrer à l'amont des rivières. De plus, la truite fario et la truite arc-en-ciel sont très souvent implantées dans des milieux pour la pêche sportive. Ainsi, l'invasion de ces espèces ont entraîné une réduction ou une élimination des truites natives par une prédation, compétition, déplacement, exclusion et une hybridation avec un appauvrissement génétique (Van Kirk et al. 2010). Aux USA, les populations de truites fario ont été multipliées par 7 dans certaines régions, il est donc plus que nécessaire de mettre en place des méthodes pour voir l'impact de ces truites et comment le réduire (Brunson 2020). C'est pour cette raison que des études ont été réalisées pour évaluer l'effet des truites non natives sur les poissons indigènes à l'échelle individuel mais aussi des populations (McHugh et Budy 2006).

La méthode utilisée est un peu comme celle de la carpe avec la méthode BACI. C'est-à-dire qu'on exclut l'espèce invasive d'un milieu et on compare son impact avant et après son introduction contrôlée. Pour mesurer l'impact des truites, une étude sur une population de truite fardée (*Oncorhynchus clarkii*) a été réalisée en présence et en absence de truite fario invasive dans de longs tronçons et par la suite différents facteurs ont été comparés : la croissance, les conditions du milieu, les mesures basées sur les isotopes stables des habitudes alimentaires, les mouvements et la survie entre les groupes de traitement (tableau 5) (McHugh et Budy 2006).

Afin d'évaluer l'impact de la truite fario sur la truite fardée, une expérience a été réalisée dans 3 rivières différentes dans l'Utah (McHugh et Budy 2006). Les sites sont choisis en fonction de 3 critères :

- 1-Ils doivent contenir des truites fario et des truites fardées.
- 2-Le site doit avoir un spectre d'habitat large dans lesquels on retrouve de la truite fardée.
- 3- Les sites doivent être suffisamment petit pour pouvoir effectuer des pêches électriques.

Cette méthode est appliquée pour les 3 sites (Blacksmith Fork River, While Rock and Curtis creek). Avant l'expérience des pêches électriques et des barrières sont installées sur les lieux d'études. Chaque truite capturée est mesurée, pesée et tagguée (PIT tag = truite fardée, T-bar anchor Tag = truite fario). Une fois cette étape réalisée une partie des truites fardées sont relâchées avec des truites fario avec un ratio 1 pour 1 et un autre groupe sans truite fario. Cette expérience a commencé en été, puis 2 mois et demi plus tard au mois de septembre, les poissons sont de nouveau mesurés, pesés et relâchés et les barrières sont inspectées quotidiennement notamment en période de crue. Les expériences ont été arrêtées en mars de l'année suivante. Les différents facteurs mesurés avec les différentes méthodes et tests sont répertoriés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5: : Méthodes et facteurs mesurés pour voir l'impact des truites fario sur les truites fardées d'après McHugh et Budy (2006) sur les trois sites différents

Facteurs	Méthodes et tests statistiques utilisés (alpha = 0,10)
Croissance spécifique	Méthode de calcul : $G = [(\log W(\text{final}) - \log W(\text{initial}))/t] \times 100$ W est le poids, t est le temps Test ANOVA pour comparer les différences de croissance.
Poids observés	Wr = (100 x W)/ Ws Ws (poids prédit) Test ANOVA
Isotope stable pour analyser l'alimentation et l'effet des truites fario sur le comportement alimentaire des truites fardées	Position trophique des individus (¹⁵ N et ¹³ C) Contenus stomacaux Test ANOVA
Conditions d'habitats : -Elévation (m) -Pente -Température (moyenne) (C°) -Débits (m ³ /s) -Volume d'eau (m ³) -Débris larges en bois (habitat) -Végétation -EPTD (Ephéméroptères, Plécoptères, Trichoptères, Diptères) : la densité (nombre/m ²) et la biomasse (mg/m ²) -Densité de truite (nombre/km)	Condition initiale et finale Test ANOVA
Croissance x Isotopes x Conditions d'habitats	Test de Fisher
Mouvement (mesure de la tendance d'une population à émigrer)	Recapture des poissons et grâce aux tags on peut voir leurs mouvements
Survie	CJS (Cormack-Jolly-Seber) est une approche permettant de modéliser la survie.

Ainsi, les deux groupes de poissons sont comparés avec ces différents facteurs pour avoir une idée de l'impact de la truite fario sur la truite fardée. D'autres études reprennent ce principe d'exclusion pour mesurer l'impact de la truite mais elles restent plus rares que pour la carpe.

Une autre méthode intéressante pour mesurer l'impact de la truite est l'utilisation de modèles mathématiques. En effet, un modèle a été mis en place dans une rivière de l'Utah pour voir l'impact de la truite fario (*Salmo trutta*) sur la truite fardée (*Oncorhynchus clarkii utah*). Les outils numériques et mathématiques peuvent fournir d'importantes informations sur l'évolution des espèces (Laplanche et al. 2018). Le but est de voir la réaction et la diffusion spatiale par différents paramètres : la croissance de la population dans des habitats hétérogènes, la compétition et la dispersion (Laplanche et al. 2018)

Le lieu d'étude est ensuite coupé en plusieurs stations et sur chacune d'elle, les différents facteurs biotiques sont étudiés en fonction de facteurs abiotiques (altitude, largeur, longueur, distance par rapport au barrage). L'étude a commencé en 2001 et se termine en 2016.

Ainsi, tous les ans une pêche électrique est réalisée entre le 15 juillet et le 10 août avec des débits identiques (2.8 m³/s). Tous les poissons capturés sont comptés ainsi que leur biomasse pour chaque espèce. Cependant, sont exclus pour les calculs statistiques : les espèces de poissons autre que la truite fario ou fardée et ceux d'âge 0.

Afin d'évaluer l'impact des truites, une période d'éradication des truites fario a été faite sur 3 années de 2009 à 2011. De cette façon, il y a deux périodes de temps qui vont pouvoir être comparées : de 2001 à 2009 avec des truites fario et des truites fardées et de 2009 à 2016 avec des densités beaucoup plus faibles de truite fario à cause de l'éradication.

La variation spatio-temporelle de la densité sur les différentes stations d'étude est modélisée avec le PDE (modèle d'équation différentielle partielle) à partir des équations de réaction-diffusion de Fisher qui représentent le déplacement des poissons (Laplanche et al. 2018).

Equations du PDE :

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial t} &= D_E \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + r_E E \left(1 - \frac{E + N/\alpha_N}{K_E(x)}\right) - R(x, t) \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= D_N \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + r_N N \left(1 - \frac{N + E/\alpha_E}{K_N(x)}\right)\end{aligned}$$

Densité de truite fario = $E(x, t)$, Densité de truite fardée = $N(x, t)$, le temps = t , D = coefficient de diffusion (km.an⁻¹), r = la croissance intrinsèque par an, k = ressource que le milieu peut supporter, α = coefficient de compétition

Ainsi grâce à cette équation, différents graphiques peuvent être réalisés notamment celui montrant la densité en fonction du temps (Figure 12) :

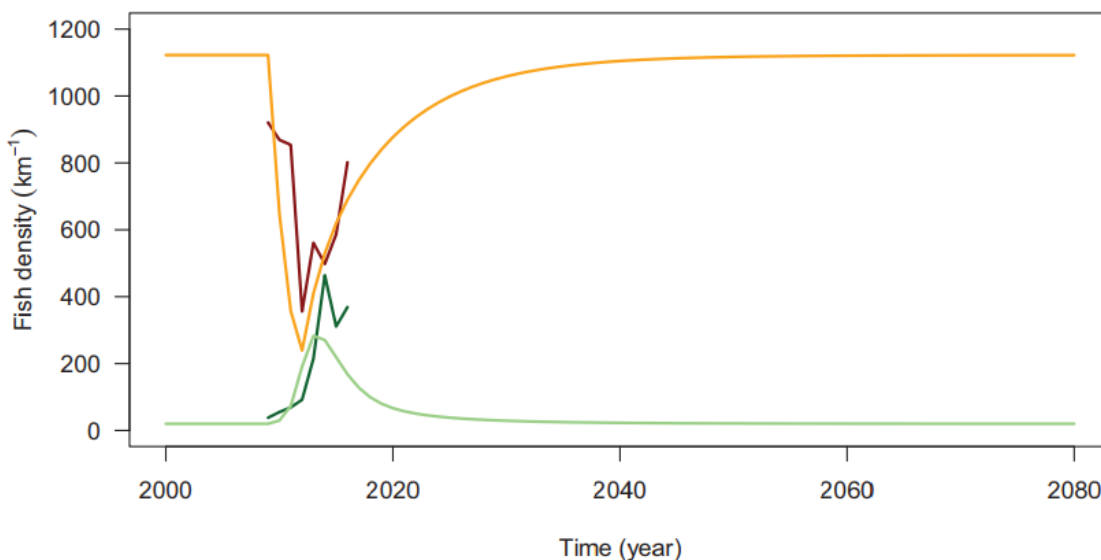


Figure 12: Réponse du système avant et après éradication de la truite fario en 2009-2011 (Laplanche et al. 2018). Couleurs : truite fario (orange), truite fardée (vert clair).

Sur la figure 12, après l'éradication en 2009–2011, la densité de truite fardée remonte. Lorsque la densité de truite fario augmente, on peut voir tout de suite que celle de la truite fardée diminue. Ce qui prouve l'impact des truites fario sur les truites natives.

Il existe aussi d'autres études qui reprennent des modèles mathématiques pour voir l'impact des truites (fario et arc-en-ciel) sur les truites natives (Van Kirk et al.2010). Le modèle de Lokta-Volterra a notamment été utilisé pour voir l'évolution des populations de truites fardées (densité, hybridation) à cause des truites fario dans la Snake River aux USA (Van Kirk et al.2010). Ce genre de calcul permet de voir les interactions entre ces deux espèces. En effet dans cette zone les truites fardées subissent des pressions importantes (hybridation, compétition, prédation...).

Le modèle de Lokta-Volterra utilisé est celui présenté ci-dessous :

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= r_1 x \left(\frac{K_1 - x - \beta_{12} y}{K_1} \right) & x &= \text{abondance de truites fario/arc-en-ciel} \\ \frac{dy}{dt} &= r_2 y \left(\frac{K_2 - y - \beta_{21} x}{K_2} \right) & y &= \text{abondance de truite fardée} \\ & & r &= \text{taux de croissance intrinsèque} \\ & & K &= \text{capacité du milieu} \\ & & \beta &= \text{paramètres d'interactions des espèces.} \end{aligned}$$

Il peut être décliné en changeant certains paramètres pour calculer : l'hybridation, la compétition, prédation et le déplacement (Van Kirk et al.2010).

Méthode pour réduire l'impact de la truite

La truite est un poisson populaire notamment pour la pêche sportive, cependant il est important d'effectuer une régulation des poissons par différentes méthodes pour réduire les impacts sur les espèces natives.

La pêche

La première technique est la pêche de loisir ou professionnelle, il s'agit en effet de la technique la plus répandue. Différents règlements ont été mis en place afin de réduire l'impact des truites fario et arc-en-ciel. Chaque pêcheur ne doit pas remettre à l'eau après capture les deux espèces de truites invasives et toutes les truites fardées devront obligatoirement être remises à l'eau (Van Kirk et al.2010) . C'est peut-être l'une des méthodes les plus efficaces et les plus éthiques, car elle permet de sélectionner les espèces de poissons que l'on veut enlever et elle peut apporter un avantage économique. De plus, les truites fario restent plutôt dans des zones qui sont accessibles contrairement à la truite fardée qui va se réfugier dans des endroits difficiles d'accès pour échapper à la prédation (voir partie impact truite) donc elles restent plus facilement pêchables. Ainsi une bonne gestion de la pêche peut avoir un impact considérable sur la ressource de poisson, cependant cette méthode ne peut pas enlever toutes les truites invasives.

Les débits

Cette méthode est plutôt pratiquée de manière locale et dans des endroits anthropisés. Aux USA, en aval de certains barrages, d'importants débits sont lâchés pendant l'incubation des œufs de truites invasives et pendant l'émergence des alevins. En effet, la truite fario pond en automne et la truite fardée au printemps, ce décalage permet de faire une sélection sur les nouveaux alevins. Cette technique est efficace mais seulement en dessous des barrages, cependant les conséquences sur les autres espèces ne sont pas identifiées (Van Kirk et al.2010).

Pêches électriques :

Dans le cadre de campagne de conservation avec le support des gouvernements et certains pêcheurs, différentes campagnes de pêches électriques sont réalisées pour enlever les truites farios

(P. Budy et Gaeta 2017). Cette méthode mécanique est peut-être celle la plus utilisée, en effet elle est pratiquée en Europe pour éviter l'hybridation des truites invasives avec les truites natives (Caudron et Champigneulle 2010). Elle est utilisée aussi aux USA, notamment lors de campagnes d'éradication de la truite fario dans la Right Hand Fork (P. Budy et Gaeta 2017). Grâce à la pêche électrique et en bloquant la migration des truites par des cascades naturelles, une grande partie des truites invasives a été enlevée d'une portion du cours d'eau d'étude. Les études ont été réalisées sur 2 années puis ils ont utilisé du roténone (voir partie chimique) pour tuer les derniers poissons présents (P. E. Budy et al. 2020). Cependant cette méthode n'est pas efficace à 100 % et il faut sans cesse la répéter (P. E. Budy et al. 2020).

Chimique :

Différents produits chimiques peuvent être utilisés pour éradiquer les truites. Comme vu précédemment avec la carpe, la roténone est utilisée depuis plus de 70 ans pour éradiquer les poissons invasifs, cependant, il existe de nombreux impacts sur les autres espèces de poissons et aussi sur les macroinvertébrés. Ainsi, un dosage très précis est nécessaire pour ne pas avoir trop d'effets secondaires sur toute la faune aquatique (Hogg, Banks, et Woods 2018).

Couplage : pêches électriques et chimie.

Deux années de pêches électriques puis deux années de traitement chimique ont permis d'éradiquer les truites fario de la rivière Right Hand Fork aux USA (P. E. Budy et al. 2020). Donc ce sont des campagnes qui sont longues (4 ans dans ce cas-là) et parfois coûteuses car elles nécessitent beaucoup de personnels et de temps pour être sûrs d'avoir enlevé la totalité des poissons. Cependant, les efforts ne sont pas sans résultats car d'après l'étude de Budy et al, les truites natives ont très vite recolonisé le milieu et ont retrouvé au bout de 6 années une population « normale » avec des classes d'âge bien réparties avec notamment des adultes, ce qui a satisfait les différents acteurs notamment les pêcheurs (P. E. Budy et al. 2020).

Le couple pêches électriques et piscicides semblent être le plus efficace, en effet dans la littérature scientifique c'est le couplage de ces deux techniques qui est utilisé dans pratiquement toutes les situations (Shepard et al. 2014).

Les différentes méthodes visant à réduire l'impact de la truite sont résumées dans le tableau ci-dessous (tableau 6) :

Tableau 6 : Résumé des différentes méthodes pour réduire l'impact de la truite.

Méthodes pour réduire l'impact de la truite		
Méthodes	Avantages	Inconvénients
Pêche (P. E. Budy et al. 2020) (Van Kirk et al. 2010)	Éthique, aucun coût, avantage économique (loisir pêche et nourriture). Bonne efficacité dans certaines zones. Protection des espèces natives par un règlement.	Méthodes limitées dans certaines zones et les truites invasives ne peuvent pas être toutes capturées.
Débit (lâchers de barrages) (Van Kirk et al. 2010)	Bonne efficacité pour éradiquer les alevins de l'année. Méthode peu coûteuse.	Méthode locale et dans des milieux où il y a des barrages. Efficace que sur les alevins de l'année Impact sur les autres espèces possible.
Pêche électrique (Caudron et Champigneulle 2010) (P. E. Budy et al. 2020)	Très bonne efficacité au long terme. Permet de sélectionner les espèces de poissons.	Longue et coûteuse. Méthode coûteuse avec un prix qui varie selon les milieux (végétation ou non) et la longueur de cours d'eau. Les pêches électriques ne peuvent pas être pratiquées partout.
Chimique (Hogg, Banks, et Woods 2018)	Méthode efficace et très utilisée aux USA. Facilité d'emploi.	L'utilisation de produit chimique doit être utilisé de manière très précise sinon les conséquences peuvent être très grave sur la faune aquatique indigène. Méthode plutôt locale sinon les conséquences seraient désastreuses.
Pêche électrique + chimique (roténone) (P. E. Budy et al. 2020) (Shepard et al. 2014)	Efficacité prouvée pour l'éradication complète des truites invasives (nombreux ouvrages scientifiques). La seule méthode pour l'instant qui permet la recolonisation des truites natives après éradication.	Coûteuse et longue (en moyenne 4 année). Méthode qui est plutôt locale.

Discussion :

Comparaison des méthodes pour mesurer l'impact entre la truite et la carpe :

Les méthodes pour mesurer l'impact de la truite sont globalement basées sur le même principe que la carpe, c'est-à-dire que les scientifiques mesurent différents paramètres avant et après introduction de l'espèce invasive afin de pouvoir comparer les éventuels changements (principe de la méthode BACI). L'autre méthode est la méthode Recovery, c'est-à-dire ils analysent la « régénération » du système après éradication de l'espèce invasive. Elle est principalement utilisée pour la carpe même si quelques études ont été publiées sur la truite aussi. En effet, il n'est pas dit explicitement qu'ils utilisent cette méthode pour la truite mais des études ont été faites sur la capacité de résilience et la recolonisation des milieux de la truite fardée après l'éradication de la truite fario (P. E. Budy et al. 2020). Ainsi, ce sont ces deux méthodes qui sont utilisées pour la carpe et la truite, cependant les paramètres mesurés sont totalement différents (tableaux 2 et 5).

En effet, la carpe est un poisson qui se nourrit principalement de végétaux et de débris sur le fond, elle affectionne les eaux chaudes et est peu polluo-sensible. Alors que la truite est un poisson qui affectionne les eaux oxygénées, fraîches et plutôt de bonnes qualités. Elle se situe dans le haut de la chaîne alimentaire dans les rivières qu'elles affectionnent, donc son principal impact sera par la prédation et la compétition. Ces différences de position trophique et de milieux font que les paramètres mesurés pour analyser l'impact des truites et des carpes sont totalement différents. Il est vrai que pour la carpe, les chercheurs vont surtout regarder les paramètres qui sont le plus impactés par sa présence, donc principalement la turbidité avec l'augmentation de nutriments dans l'eau. Ce sont des paramètres abiotiques qui de par leurs modifications vont avoir des impacts sur les paramètres biotiques. La carpe a cette capacité de modifier son environnement, elle peut rendre un écosystème aquatique avec une eau claire dominé par les macrophytes à un état turbide dominé par le phytoplancton. Ainsi, la carpe est considérée comme une espèce ingénieuse, c'est-à-dire qu'elle peut moduler indirectement ou directement son environnement et réguler les ressources disponibles aux autres espèces (Badiou et al. 2011). La truite modifie plutôt la structure des populations présentes. C'est pour cette raison, qu'à travers les différents articles, les chercheurs se concentrent principalement sur la modification de facteurs biotiques à partir des 4 impacts principaux que la truite peut engendrer sur les espèces indigènes. Ces 4 facteurs sont la compétition, l'hybridation, la prédation et le mouvement des espèces indigènes.

De par son impact ciblé sur quelques espèces présentes, différents modèles mathématiques peuvent être utilisés contrairement à la carpe où l'impact est systémique et donc difficilement modélisable. Ainsi, en écologie, il existe plusieurs équations et modèles qui permettent de voir l'impact d'une espèce sur une autre et qui sont donc utilisés pour voir l'impact de la truite (Lokta-Volterra, PDE, figure 5).

Ce qui est aussi très intéressants avec ce genre de modèles numériques et mathématiques notamment avec le PDE c'est qu'ils peuvent simuler différents scénarios en changeant les paramètres du modèle. En effet, en changeant la réponse de la truite indigène par rapport à la truite invasive, il est possible de simuler différents scénarios. Les figures 13 et 14 montrent bien les différents scénarios que l'on peut avoir avec : aucune ou faible réponse de la truite fardée après éradication de la truite fario (Figure 13) ou une réponse qui entrainerait une éradication de la truite fario (Figure 14)

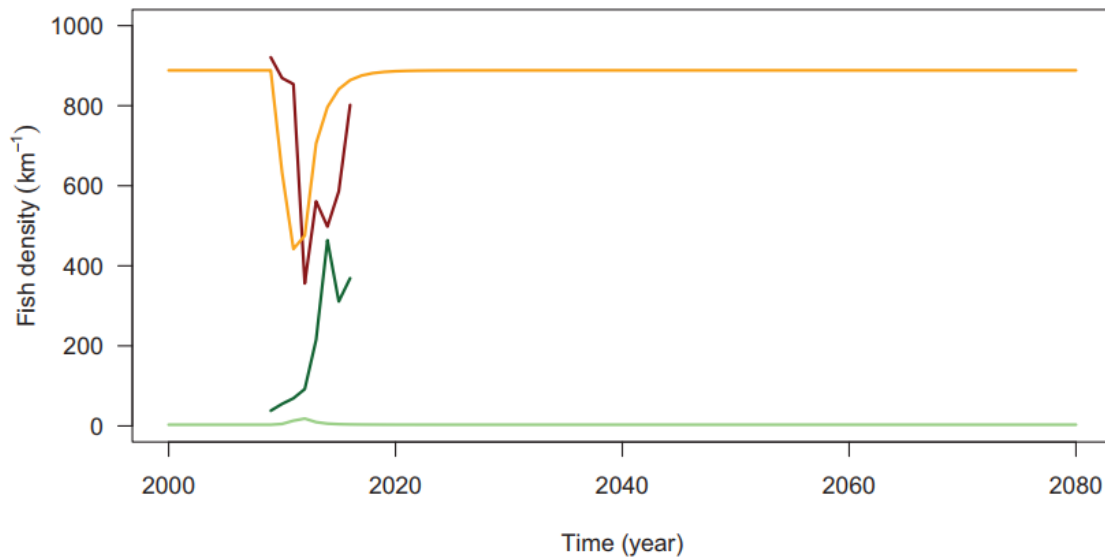


Figure 13 : Simulation du modèle avec une faible réponse de la truite fardée après éradication de la truite fario (Laplanche et al. 2018). Légende : truite fario : orange, truite fardée : vert clair.

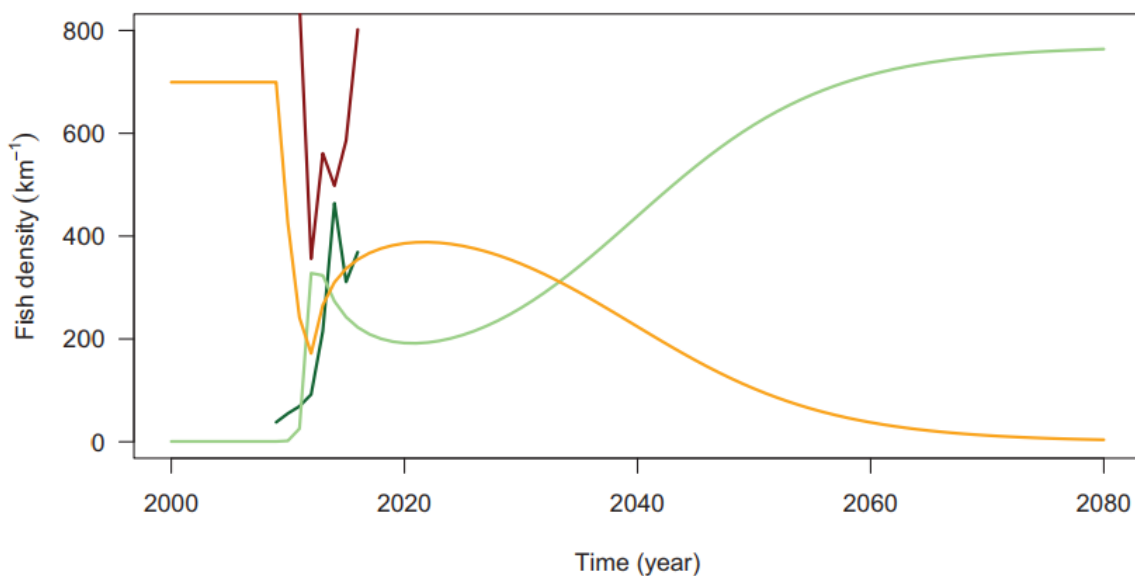


Figure 14 : Réponse qui entrainerait à une éradication de la truite fario (Laplanche et al. 2018). Légende : truite fario : orange, truite fardée : vert clair

Ce genre de modèle est très utile pour avoir une estimation du comportement des espèces indigènes afin de prendre des décisions pour réduire l'impact des truites (Laplanche et al. 2018).

Comparaison des méthodes pour réduire l'impact :

Pour la carpe il existe des méthodes directes et indirectes pour lesquelles les différents avantages et inconvénients sont inscrits (Tableaux 3, 4). Cependant, en comparaison avec les méthodes utilisées pour réduire l'impact de la truite, celles employées pour les salmonidés ne sont que directes, il n'y a pas d'étude sur des méthodes indirectes. Il est important de noter que la littérature sur la carpe est vraiment importante et plus complète que pour la truite. En effet, les différentes études qui ont été faites notamment par Koehn sont vraiment très riches, avec un management des impacts très détaillés et plus complets. Cependant, sur le management des impacts ils manquent encore des

données car il y a tellement de facteurs sur lesquelles la carpe influe qu'il est difficile de tous les mesurer et d'avoir un recul suffisant. Les méthodes indirectes pour la carpe semblent être les plus efficaces sur le long terme mais elles prennent beaucoup de temps et les travaux sont parfois très lourds. Cependant, il est nécessaire d'agir car les impacts économiques sociaux et environnementaux sont très importants (Koehn et al. 2000).

Les impacts sont peut-être plus importants pour la carpe car elle modifie totalement son milieu et surtout la qualité de l'eau ce qui est préoccupant d'un point de vue économique et sanitaire.

Pour la truite les principales méthodes utilisées sont directes. De plus, ses impacts ont été découverts plutôt récemment par rapport à la carpe (P. Budy et Gaeta 2017). Il semble plus difficile d'agir à grande échelle sur des milieux aussi fragiles que colonisent la truite. Les deux seules méthodes recensées dans la littérature scientifique car elles ont prouvé qu'elles étaient efficaces sont les pêches électriques couplées à la chimie (roténone) sur plusieurs années (P. E. Budy et al. 2020). Il est vrai que les impacts étant moins visibles et peut-être moins globaux et importants que pour la carpe, il est possible que les autorités s'en préoccupent moins.

Un autre facteur qui est paradoxal et qui ne va pas en faveur de la protection de l'environnement, c'est la popularité de la truite fario. En effet même si ses impacts négatifs sont maintenant acceptés, la truite reste un poisson très populaire car c'est un poisson de sport et de nombreuses piscicultures sont encore actives aux USA afin de satisfaire les pêcheurs. En effet, des records de truites sont présents en Nouvelle-Zélande et dans certaines régions aux USA (Utah, Colorado, Arizona, Nevada...) donc elles attirent énormément de pêcheurs (P. Budy et Gaeta 2017). Il est vrai que la truite fario est vu comme un poisson noble et comme l'un des plus difficiles à attraper. De plus, elle est souvent bien plus grosse que les truites natives donc très appréciées par les pêcheurs. Ceux-ci viennent juste pour la popularité de la truite car réputée pour être difficile à attraper. Pour avoir des poissons trophées, les pêcheurs pratiquent maintenant énormément le « no-kill » donc ils relâchent leurs truites, ceci les rend plus méfiantes et donc augmente le challenge de les capturer. Ainsi, une grande partie des truites fario survivent et les dégâts sur les espèces indigènes sont importants (P. E. Budy et al. 2020).

Cette passion de la traque pour la truite est aussi amplifiée avec les différentes associations de conservation des truites comme « Trout Unlimited » aux USA avec pas moins de 150 000 membres (P. Budy et Gaeta 2017).

Ainsi l'impact de ces deux espèces et leur gestion sont totalement différents, en effet leurs milieux d'intégrations et leurs comportements (alimentaire, reproducteur) sont distincts.

Conclusion :

La truite et la carpe sont des poissons qui font partis de la liste des 100 espèces exotiques envahissantes parmi les plus néfastes du monde d'après l'UICN. Ainsi, les impacts qu'elles vont engendrer de par leurs différentes introductions peuvent être importants. Cependant, ces espèces sont continuellement introduites de manière intentionnelle ou non dans les écosystèmes aquatiques des différentes régions du monde (Badiou et al. 2011).

Ces deux espèces de poissons sont totalement différentes d'un point de vue écologique ce qui entraîne des impacts et des méthodes de gestion différentes. Cependant d'après Koehn (2000) la carpe peut avoir un impact plus alarmant car elle touche pratiquement tous les secteurs : économique, écologique et sanitaire. Alors que la truite semble impacter que l'écologie de son milieu en entraînant une disparition rapide des espèces indigènes. De ce fait, il est impératif avant d'entreprendre des actions de réduction d'impact d'avoir assez de recul sur l'écologie des espèces invasives, leurs sensibilités à certaines méthodes et de bien peser les avantages et inconvénients de chacune des méthodes. Il est important de noter que ces poissons ont une certaine popularité dans le loisir pêche et pour la nourriture qu'ils offrent (P. E. Budy et al. 2020). Ainsi, la truite et la carpe procurent des avantages économiques importants dans certaines régions, ce qui ne facilite pas le contrôle de ces deux espèces (Koehn et al. 2000)(P. E. Budy et al. 2020).

Cependant, le problème des espèces invasives devient très préoccupant dans différents endroits du globe. À cause du dérèglement climatique, les écosystèmes deviennent plus chauds et plus sensibles, ces conditions rendent plus fragiles les espèces indigènes ce qui crée une opportunité de développement à de nouvelles espèces. C'est le cas de la carpe, qui affectionne les eaux chaudes et stagnantes et qui se développe de manière anarchique à cause de conditions qui lui sont favorables (Marshall et al. 2019).

Bien que les impacts directs et indirects de ces espèces soient assez bien documentés, il est nécessaire d'approfondir encore plus ces différentes recherches afin de mettre en place les meilleures méthodes pour avoir une très bonne efficacité sur chaque espèce et un recul nécessaire (Badiou et al. 2011). Avec le réchauffement climatique et la dégradation des écosystèmes, ces futurs travaux seront bénéfiques pour les prochaines années afin de gérer au mieux l'impact des espèces invasives.

Bibliographie :

- Badiou, Pascal, L. Goldsborough, et D. Wrubleski. 2011. « Impacts of the common carp (*Cyprinus carpio*) on freshwater ecosystems: A review ». *Carp: Habitat, Management and Diseases*, mars, 121-46.
- Brunson, Clint. 2020. « Evaluating the Effect of the Removal of Non-Native Trout in Two High Elevation Tributary Streams in the Intermountain West ». *All Graduate Plan B and other Reports*, août. <https://digitalcommons.usu.edu/gradreports/1471>.
- Budy, Phaedra E., Timothy Walsworth, Gary P. Thiede, Paul D. Thompson, Matthew D. McKell, Paul B. Holden, Paul D. Chase, et W. Carl Saunders. 2020. « Resilient and Rapid Recovery of Native Trout after Removal of a Non-Native Trout ». *Conservation Science and Practice* n/a (n/a): e325. <https://doi.org/10.1111/csp2.325>.
- Budy, Phaedra, et Jereme W Gaeta. 2017. « Brown Trout as an Invader A Synthesis of Problems and Perspectives in North America », 523-43.
- Cambray, J A. 2003. « The global impact of alien trout species—a review; with reference to their impact in South Africa ». *African Journal of Aquatic Science* 28 (1): 61-67. <https://doi.org/10.2989/16085914.2003.9626601>.
- Carosi, Antonella, Gianfrancesco Bonomo, et Massimo Lorenzoni. 2020. « Effectiveness of alien brown trout *Salmo trutta* L. removal activities for the native trout conservation in Mediterranean streams ». *Journal of Applied Ichthyology* 36 (4): 461-71. <https://doi.org/10.1111/jai.14063>.
- Caudron, Arnaud, et Alexis Champigneulle. 2010. « Multiple electrofishing as a mitigate tool for removing nonnative Atlantic brown trout (*Salmo trutta* L.) threatening a native Mediterranean brown trout population ». *European Journal of Wildlife Research* 57 (juin): 575-83. <https://doi.org/10.1007/s10344-010-0468-8>.
- Colvin M.E, Stewart T.W, Pierce C.L, et Grummer S.E. 2012. « Strategies to Control a Common Carp Population by Pulsed Commercial Harvest ». *North Am. J. Fish. Manage. North American Journal of Fisheries Management* 32 (6): 1251-64.
- Crowl, Todd A, Colin R Townsend, et Angus R McIntosh. 1992. « The Impact of Introduced Brown and Rainbow Trout on Native Fish: The Case of Australasia ». *Rev Fish Biol Fisheries Reviews in Fish Biology and Fisheries* 2 (3): 217-41.
- Flecker, Alexander S., et Colin R. Townsend. 1994. « Community-Wide Consequences of Trout Introduction in New Zealand Streams ». *Ecological Applications* 4 (4): 798-807. <https://doi.org/10.2307/1942009>.
- Hillyard, Karl, Benjamin Smith, Anthony Conallin, et Bronwyn Gillanders. 2010. « Optimising exclusion screens to control exotic carp in an Australian lowland river ». *Marine and Freshwater Research - MAR FRESHWATER RES* 61 (janvier). <https://doi.org/10.1071/MF09017>.
- Hogg, Ian D, Jonathan C Banks, et Steve M Woods. 2018. « Biodiversity Genomics: Monitoring Restoration Efforts Using DNA Barcoding and Environmental DNA ».
- IUCN--The World Conservation Union et Invasive Species Specialist Group. 2000. *100 of the World's Worst Invasive Species: A Selection from the Global Invasive Species Database*. Auckland, N.Z.: Invasive Species Specialist Group.
- Jones, Peter, et Gerard Closs. 2017. « The Introduction of Brown Trout to New Zealand and Their Impact on Native Fish Communities ». Wiley Online Library. John Wiley & Sons, Ltd. 13 octobre 2017. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119268352.ch21>.
- Keith, P., et J. Allardi. 1997. « Bilan des introductions des poissons d'eau douce en France ». *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, n° 344-345: 181-91. <https://doi.org/10.1051/kmae:1997021>.
- Keith, Philippe, Henri Persat, Éric Feunteun, et Jean Allardi. 2011. *Les Poissons d'eau douce de France*. BIOTOPE.

- Koehn, John. 2001. « Rationale, results and management implications of recent carp research in Australia », janvier.
- Koehn, John, AR Brumley, M Bomford, et Peter Gehrke. 2000. *Managing the Impacts of Common Carp*.
- Koehn, John, et Simon Nicol. 1998. « Habitat and movement requirements of fish ». In , 1-6.
- Laplanche, Christophe, Arnaud Elger, Frédéric Santoul, Gary P. Thiede, et Phaedra Budy. 2018. « Modeling the Fish Community Population Dynamics and Forecasting the Eradication Success of an Exotic Fish from an Alpine Stream ». *Biological Conservation* 223 (juillet): 34-46. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.024>.
- Le Monde.fr. 2019. « Une espèce de poissons d'eau douce sur cinq menacée en France », 11 juillet 2019. https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/07/11/une-espece-de-poissons-d-eau-douce-sur-cinq-menacee-en-france_5488191_3244.html.
- Lintermans, Mark. 2004. « Human-Assisted Dispersal of Alien Freshwater Fish in Australia ». *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research - N Z J MAR FRESHWATER RES* 38 (août): 481-501. <https://doi.org/10.1080/00288330.2004.9517255>.
- « Liste des espèces de poissons protégées sur l'ensemble du territoire français national ». s. d. Consulté le 23 mars 2020. <https://inpn.mnhn.fr/reglementation/protection/listeEspecesParArrete/716>.
- Mallen-Cooper, Martin. 1996. « Fishways and Freshwater Fish Migration on South-Eastern Australia ».
- Marshall, Jonathan C., Joanna J. Blessing, Sara E. Clifford, Kate M. Hodges, Peter M. Negus, et Alisha L. Steward. 2019. « Ecological Impacts of Invasive Carp in Australian Dryland Rivers ». *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 29 (11): 1870-89. <https://doi.org/10.1002/aqc.3206>.
- McHugh, Peter, et Phaedra Budy. 2006. « Experimental Effects of Nonnative Brown Trout on the Individual- and Population-Level Performance of Native Bonneville Cutthroat Trout ». *TAFS Transactions of the American Fisheries Society* 135 (6): 1441-55.
- McNeely, Jeffrey A, Harold A Mooney, Laurie E Neville, Peter Johan Schei, J. K Waage, Global Invasive Species Programme, International Council of Scientific Unions, Scientific Committee on Problems of the Environment, et International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. 2001. *Global Strategy on Invasive Alien Species*.
- Moyle, Peter B, et Theo Light. 1996. « Biological Invasions of Fresh Water: Empirical Rules and Assembly Theory ». *Biological Conservation Biological Conservation* 78 (1-2): 149-61.
- Richardson, D. M, P Pysek, M Rejmanek, M. G Barbour, F. D Panetta, et C. J West. 2000. « Naturalization and Invasion of Alien Plants: Concepts and Definitions ». *DIVERSITY AND DISTRIBUTIONS* 6 (2): 93-108.
- Roberts AM. 1994. « Spring Viraemia of Carp. » *The Veterinary Record* 134 (24).
- Roberts, Jane, Richard D. J Tilzey, CSIRO (Australia), et Division of Land and Water, éd. 1997. *Controlling Carp: Exploring the Options for Australia*. Griffith, N.S.W.: CSIRO Land and Water.
- Shepard, Bradley, Lee Nelson, Mark Taper, et Alexander Zale. 2014. « Factors Influencing Successful Eradication of Nonnative Brook Trout from Four Small Rocky Mountain Streams Using Electrofishing ». *North American Journal of Fisheries Management* 34 (septembre). <https://doi.org/10.1080/02755947.2014.942042>.
- « Spring Viraemia of Carp Virus - an overview | ScienceDirect Topics ». s. d. Consulté le 16 novembre 2020. <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/spring-viraemia-of-carp-virus>.
- Stuart, Ivor G, Alan Williams, John McKenzie, et Terry Holt. 2011. « Managing a Migratory Pest Species: A Selective Trap for Common Carp ». *North American Journal of Fisheries Management North American Journal of Fisheries Management* 26 (4): 888-93.
- Townsend, Colin R. 1996. « Invasion Biology and Ecological Impacts of Brown Trout *Salmo Trutta* in New Zealand ». *Biological Conservation* 78 (1-2): 13-22. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(96\)00014-6](https://doi.org/10.1016/0006-3207(96)00014-6).

- « UICN, 2016 ». s. d. Consulté le 19 mars 2020. https://uicn.fr/wp-content/uploads/2016/09/UICN_Guide_EEE_entreprises_L1.pdf.
- « Une espèce de poissons d’eau douce sur cinq menacée en France métropolitaine ». 2019. *UICN France* (blog). 11 juillet 2019. <https://uicn.fr/liste-rouge-poissons-d-eau-douce/>.
- Van Kirk, Robert, Laurie Battle, et William Schrader. 2010. « Modelling Competition and Hybridization between Native Cutthroat Trout and Nonnative Rainbow and Hybrid Trout ». *Journal of Biological Dynamics* 4 (2): 158-75.
- Vilizzi, L., A. S. Tarkan, et G. H. Copp. 2015. « Experimental Evidence from Causal Criteria Analysis for the Effects of Common Carp *Cyprinus Carpio* on Freshwater Ecosystems: A Global Perspective ». *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture* 23 (3): 253-90. <https://doi.org/10.1080/23308249.2015.1051214>.