

ANGUILLES-OUVRAGES

PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE-DEVELOPPEMENT 2008-2009

**DOMMAGES SUBIS PAR LES ANGUILLES LORS DE LEUR
PASSAGE AU TRAVERS DES TURBINES KAPLAN**

Etablissement de formules prédictives

GOMES P., LARINIER M.

Décembre 2008

Document final
RAPPORT GHAAPPE RA08.05



POLE ECOHYDRAULIQUE – ONEMA – Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

Allée du Professeur Camille Soula. 31400 TOULOUSE – Tél : 05.61.28.58.69 – Fax : 05.61.28.58.97

ANGUILLES-OUVRAGES

PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE-DEVELOPPEMENT 2008-2009



www.onema.fr

ADEME



www.ademe.fr



www.france-hydro-electricite.fr



www.edf.fr



www.shem.fr

GDF SUEZ



www.cnr.tm.fr

Depuis plusieurs décennies, l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) présente de nets signes de déclin de son abondance sur l'ensemble de son aire de répartition (Dekker, 2004). Elle fait aujourd'hui partie des espèces menacées et au vu des bilans la situation est aujourd'hui devenue critique. Plus qu'un facteur en particulier, c'est une multiplicité de facteurs qui sont à l'origine de cette diminution continue. Il est donc essentiel de réduire significativement les pressions qui pèsent sur le stock (pêche et aspects environnementaux), mais aussi d'intervenir sur les obstacles à sa libre circulation qui constituent l'un des principaux facteurs limitant son aire de répartition en milieu continental avec des blocages à la montaison et des dommages lors de la dévalaison (dommages et mortalités suite au passage au travers des turbines).

Afin de restaurer le stock d'anguille, l'Union européenne a pris des mesures de protection au travers du règlement CE n° 1100/2007 du 18 septembre 2007. Le récent règlement européen pour la reconstitution du stock d'anguilles a défini un objectif d'atteindre un taux d'échappement de géniteurs équivalent à 40% de la biomasse « pristine » (état naturel sans pression anthropique impactant le stock).

Le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire ainsi que le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche ont été chargés de mettre en place un Plan de Gestion national pour la reconstitution du stock d'anguilles comportant des mesures sur les différents facteurs de mortalités anthropiques. Afin de mener à bien ce Plan de Gestion, un Comité National Anguille a été mis en place, ainsi que plusieurs groupes de travail thématiques, dont le groupe de travail « Ouvrages ».

Le **groupe de travail « Ouvrages »** a rendu un rapport validé par le Comité National le 9 janvier 2008. Celui-ci a conclu notamment à l'intérêt de la mise en œuvre d'un programme de Recherche et de Développement qui a pour objectif la mise en œuvre d'un certain nombre d'actions visant à acquérir une meilleure connaissance du comportement et des rythmes de dévalaison de l'anguille, à évaluer l'impact des aménagements hydroélectriques à la dévalaison (mortalités dans les turbines et impacts cumulés des aménagements sur un axe donné), à développer et évaluer de nouvelles techniques visant à réduire les mortalités dans les turbines (prises d'eau ichtyocompatibles, turbines ichtyophiles, biomoniteurs, barrières comportementales).

Dans ce contexte un certain nombre **d'actions communes de Recherche et Développement** sur le franchissement des ouvrages par l'anguille européenne ont été engagées en 2008 et 2009, actions qui ont fait l'objet d'un **accord cadre** signé par les principaux acteurs : Electricité de France, France Hydroélectricité, GDF-SUEZ, la Compagnie Nationale du Rhône, la Société Hydroélectrique du Midi, l'ADEME et l'ONEMA.

La présente étude est issue de cet accord-cadre et constitue l'**action n°3** de ce programme R&D.

DOMMAGES SUBIS PAR LES ANGUILLES LORS DE LEUR PASSAGE AU TRAVERS DES TURBINES KAPLAN - ETABLISSEMENT DE FORMULES PREDICTIVES.

LARINIER M., GOMES P., 2008.

ANGUILLES-OUVRAGES PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE-DEVELOPPEMENT

RESUME

Le règlement européen exige l'évaluation au niveau de chaque bassin des mortalités d'ordre anthropiques, dont celles induites par les aménagements hydroélectriques. Les dommages potentiels lors du transit à travers une turbine peuvent être évalués par des expérimentations, qui constituent cependant des opérations très lourdes et ne peuvent être menées que sur un nombre très limité de sites. Ces dommages peuvent cependant être approchés sur une installation donnée par des formules prédictives établies à partir d'expérimentations effectuées sur d'autres sites. L'objectif de cette étude est de proposer des relations liant les pourcentages de mortalités à la taille de l'individu et aux caractéristiques des turbines Kaplan à partir du recueil, de l'évaluation et de l'analyse des résultats de tous les tests significatifs de mortalités effectués en Europe et en Amérique du Nord. Sur l'ensemble de ces expérimentations ont été retenus 71 essais pour lesquels on dispose de la plupart voire de toutes les informations nécessaires, dont 29 essais réalisés à pleine ouverture de la roue. Le taux de mortalité moyen est de 51.9% sur l'ensemble des essais toutes ouvertures confondues et de 43.5% sur les essais réalisés à pleine ouverture. L'examen des résultats montre que l'importance des dommages augmente avec la taille de l'anguille. Les taux de mortalité sont plus élevés sur les petites turbines à vitesses de rotation élevées que sur les turbines à grands diamètres. Les dommages semblent d'autre part moins importants à pleine ouverture qu'à ouverture réduite. La variabilité des taux de dommages semble notable sur une turbine donnée d'un essai à l'autre et sur des turbines de caractéristiques voisines. On a établi trois expressions à partir des essais effectués à ouverture supérieure à 70% et en s'appuyant uniquement sur des données facilement accessibles. Ces expressions permettent d'obtenir l'ordre de grandeur de la mortalité en fonction de la taille de l'anguille, du diamètre de la roue, du débit nominal et de la vitesse de rotation de la turbine. Ces expressions, appliquées à un échantillon d'une soixantaine de turbines, donnent des prédictions de mortalités très voisines les unes des autres.

Mots clés: Turbine Kaplan, anguille, dévalaison, dommages, modèle prédictif.

ABSTRACT

The European regulation on eel requires evaluations of anthropogenic losses to be carried out in all basins, including damage to silver eel related to passage at hydropower sites. The potential damage caused by turbines can be assessed through on-site experiments, which are very onerous and as a result can only be carried out on a very limited number of sites. The damage can also be roughly estimated on a given installation using predictive models established from experiments carried out on other sites. The aim of this study was to establish relationships linking the rate of damage to the length of eels and the characteristics of turbines from the collection and the analysis of the results of field studies performed in Europe and North America. Of these experiments, 71 were retained (29 tests with full blade opening) for which all necessary parameters were available. The average mortality rate is 51.9%, irrespective of blade opening, and 43.5% for tests with full blade opening. The damage rate increases with fish length and is generally higher on small turbines with high rotation than on large diameter turbines. The damage also seems to be lower at full opening than at reduced opening. However, the variability of test results is noticeable from one test to another on the same turbine and on turbines with very close characteristics. Three equations using easily accessible parameters are proposed from tests performed with more than 70% blade opening. These equations enable us to make a rough estimate of the damage according to fish length, wheel diameter, nominal discharge flow and speed of rotation. These equations, when applied to around sixty existing turbines, give estimates that are very close to each other.

Key words: Kaplan turbine, eel, downstream migration, damage, predictive model.

DOMMAGES SUBIS PAR LES ANGUILLES LORS DE LEUR PASSAGE AU TRAVERS DES TURBINES KAPLAN - ETABLISSEMENT DE FORMULES PREDICTIVES.

GOMES P., LARINIER M., 2008.

ANGUILLES-OUVRAGES PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE-DEVELOPPEMENT

SYNTHESE OPERATIONNELLE

1. Afin de restaurer le stock d'anguille en constant déclin, l'Union Européenne a pris des mesures de protection au travers du règlement CE n° 1100/2007 du 18 septembre 2007. Ce règlement européen exige l'évaluation au niveau de chaque bassin des impacts d'ordre anthropiques, dont ceux induits par les aménagements hydroélectriques et plus particulièrement les dommages et mortalités lors du passage au travers des turbines.

2. Les dommages potentiels lors du transit à travers une turbine sont généralement évalués grâce à des expérimentations. Elles constituent cependant des opérations très lourdes et ne peuvent être menées que sur un nombre très limité de sites. Les dommages peuvent aussi être approchés sur une installation donnée par des formules prédictives établies à partir d'expérimentations effectuées sur d'autres sites ou en extrapolant les résultats de tests effectués sur des turbines de caractéristiques voisines. L'objectif de cette étude est de proposer des relations liant les pourcentages de mortalités aux caractéristiques des turbines à partir du recueil, de l'évaluation et de l'analyse des résultats de tous les tests significatifs de mortalités effectués en Europe et en Amérique du Nord.

4. Un précédent travail (Larinier & Dartiguelongue, 1989) recensant et synthétisant les expérimentations effectuées sur l'évaluation des dommages subies par les migrateurs, en particulier les anguilles, avait été réalisé. Plusieurs expressions avaient été proposées permettant d'obtenir un ordre de grandeur des mortalités pour une turbine donnée. Des relations avaient été proposées pour les salmonidés et pour l'anguille. Cependant, pour l'anguille, les statistiques ne portaient que sur un nombre d'installations très limitées et sur des turbines de dimensions modestes. L'objet de ce présent rapport est d'actualiser cette étude en prenant en compte les expérimentations réalisées depuis et de proposer de nouvelles relations entre le taux de mortalités et les caractéristiques des turbines.

5. Ce travail ne porte que sur les turbines Kaplan, le nombre d'expérimentations concernant les turbines Francis étant trop limité pour pouvoir proposer une quelconque relation prédictive. Les quelques expérimentations effectuées sur les turbines Francis ont montré que les dommages subis lors du transit par une turbine Francis de caractéristiques données ne sont pas plus importantes que celles à travers une turbine Kaplan de même débit équipant la même chute.

6. Différents facteurs peuvent sources de lésions lors du passage des poissons dans les turbines. Même si le même type de blessures peut être attribué à des causes différentes suivant les auteurs, les dommages ont été généralement classés en trois catégories, suivant qu'ils résultent de chocs mécaniques résultant d'un contact plus ou moins violent du poisson avec un élément fixe ou mobile de la turbine, de variations rapides de la pression et de la cavitation ou encore des forces de cisaillement (gradients de vitesses).

7. Les premiers constats des dommages importants sur les anguilles argentées imputables à leur transit par une centrale hydroélectrique remontent au début du siècle dernier, les premières expérimentations visant à quantifier ces dommages datant des années 1930-1940. Les observations ou expérimentations montrent que les dommages sont notables, même sur les turbines de grand diamètre. Ils sont généralement supérieurs à 15-20%.

8. Les dommages sur l'anguille sont avant tout liés à des facteurs d'origine mécanique. Les blessures les plus souvent observées sont en effet des sectionnements totaux, des sectionnements partiels, des dilacérations ou autres blessures externes ainsi que des déformations importantes, voire des ruptures de la colonne vertébrale sans blessure externe. La résistance physique de l'anguille, les faisant paraître indemnes suite au passage par la turbine, a été notée par plusieurs auteurs. Lors des

expérimentations, le maintien d'anguille en stabulation, même pendant des périodes assez longues après leur passage dans une turbine, réduit le biais résultant de la mortalité différée, mais ne tient pas compte des effets sub-létaux sur le comportement, la migration et la survie à terme.

9. On a regroupé, analysé et sélectionné les résultats des expérimentations pouvant être exploités pour un traitement statistique. Les informations extraites des différentes expérimentations quand elles étaient disponibles sont les caractéristiques de la turbine (hauteur de chute, débit à pleine ouverture, diamètre de la roue, vitesse de rotation, nombre de pales...), les conditions de fonctionnement de la turbine lors des essais, la méthodologie expérimentale, le nombre de poissons relâchés (test et contrôle), les taux de recapture (test et contrôle), le type de dommage et les taux de mortalité immédiate et après délais. Sur l'ensemble de ces expérimentations, n'ont été retenus que 71 essais pour lesquels on dispose de la plupart voire de toutes les informations nécessaires, dont 29 essais réalisés à pleine ouverture. La plupart des expérimentations sont cependant entachées d'un certain biais, ayant tendance soit à surestimer, soit au contraire à sous-estimer les dommages. Ces biais, liés aux protocoles expérimentaux (passages naturels ou injection de lots, méthodes de recapture, prise en compte ou non de la mortalité différée...), sont cependant impossibles à quantifier.

10. Si on considère l'ensemble des essais, toutes ouvertures confondues, le taux de mortalité moyen est de 51.9% (médiane = 52.8%, Q25 = 25% et Q75 = 75%). Sur les essais réalisés à pleine ouverture, la valeur moyenne de la mortalité est de 43.5% (médiane = 45%, Q25 = 24% et Q75 = 60%).

11. L'examen des résultats montre que l'importance des dommages augmente avec la taille de l'anguille. Les taux de mortalité sont plus élevés sur les petites turbines à vitesses de rotation élevées que sur les turbines à grands diamètres. Les dommages semblent d'autre part moins importants à pleine ouverture qu'à ouverture réduite. La variabilité des taux de dommages semble notable sur une turbine donnée d'un essai à l'autre et sur des turbines de caractéristiques voisines.

12. Les formules de prédiction ont été établies à partir des essais effectués à ouverture supérieure à 70%, c'est-à-dire pour les conditions de fonctionnement les moins dommageables pour les poissons. L'intérêt de formules prédictives prenant en compte le degré d'ouverture des turbines est plus limité, l'essentiel de la dévalaison de l'anguille s'effectuant à des débits importants et donc à des périodes où il est généralement possible de faire fonctionner les turbines à pleine ouverture.

13. Les régressions ont été effectuées directement sur les pourcentages de mortalité M (en %). On propose trois expressions donnant un pourcentage de mortalité en fonction de la taille de l'anguille TL (en m), du diamètre de la roue Dr (en m), du débit nominal Q (en m³/s) et de la vitesse de rotation de la turbine N (en trs/min) :

$$\begin{aligned}M (\%) &= 4.67 TL^{1.53} Dr^{-0.48} N^{0.6} \\M (\%) &= 6.59 TL^{1.63} Q^{-0.24} N^{0.63} \\M (\%) &= 12.42 TL^{1.36} Q^{-0.22} Dr^{-0.10} N^{0.49}\end{aligned}$$

Ces expressions, appliquées à un échantillon d'une soixantaine de turbines, donnent des prédictions de mortalités très voisines. Les formules proposées ne s'appuient que sur des données facilement accessibles. Ces expressions permettent d'obtenir de façon très simple l'ordre de grandeur des dommages au passage d'une turbine Kaplan classique.

14. Ni la hauteur de chute, ni le nombre de pales n'interviennent dans les formules prédictives. Cela s'explique par le nombre limité de tests et surtout l'absence de données pour certaines architectures de turbines Kaplan. On a dans l'échantillon une bonne représentation des turbines comportant 4 pales (les plus fréquentes sur les très basses chutes). On a par contre une sous-représentation des turbines comportant 3 ou 5 pales et plus, des petites turbines de puissances inférieures à 500 kW fonctionnant sous très basses chutes (<3-4 m) et turbinant des débits relativement faibles (<15-20 m³/s), ainsi que des grosses turbines de 10 à 50 MW à débits de l'ordre de 150-300 m³/s fonctionnant sous 10-20 m de chute.

15. Les pourcentages de mortalités observés ont été comparés à ceux donnés par les approches conceptuelles des probabilités de chocs corrigées par les facteurs de mutilation Kv, Kt, Ka proposés par Von Raben, Turnpenny et le laboratoire d'Alden. Le facteur de mutilation constant proposé par Von Raben semble de loin le meilleur des trois, ce qui n'a rien d'étonnant dans la mesure où le

coefficient K_t a été calé sur des observations portant sur l'anguille. La formule de Von Raben donne des valeurs qui sont relativement proches de celles données par les formules obtenues par régression. Elle donne en moyenne des valeurs sensiblement égales pour la taille $TL = 0.70$ m, et respectivement plus forte et plus faible pour les tailles de 0.50 m et 0.90 m. Cela s'explique par le fait que le taux de mortalité croît linéairement avec la taille dans la probabilité de choc alors que les expérimentations ont montré que la taille intervenait à une puissance significativement supérieure à 1. Le recours aux facteurs de mutilation de Turnpenny et Alden développés pour d'autres espèces plus fragiles que l'anguille et des tailles d'individus plus faibles conduisent à une surestimation systématique des dommages. On préférera, pour la prédiction des dommages, l'utilisation des expressions statistiques présentées ci-dessus à celle des expressions issues de l'approche conceptuelle des probabilités de chocs.

16. Les relations prédictives des dommages proposées dans le présent rapport ne sont pas applicables aux turbines «fish friendly» ou «ichtyophiles®» dont les architectures sont très différentes de celles des turbines Kaplan, les relations entre diamètres, vitesses de rotation, nombre de pales n'ayant plus rien à voir avec celles régissant les turbines classiques. Le principe ayant guidé à la conception des turbines dites «ichtyophiles®» a été de réduire les principaux facteurs de mortalité, en particulier les dommages liés à la pression et aux gradients de pression, aux cisaillements et surtout, pour ce qui concerne l'anguille, aux facteurs mécaniques (probabilité et violence des chocs). Par rapport à une turbine classique dimensionnée pour la même chute et le même débit, le diamètre d'une turbine «ichtyophile» sera augmenté, sa vitesse de rotation et sa vitesse périphérique réduites, ainsi que dans certains cas le nombre de pales. Les expérimentations récentes menées sur la turbine «ichtyophile®» VLH (Very Low Head) à la centrale de Troussy sur le Tarn ont mis en évidence des mortalités moyennes beaucoup moins importantes que sur une turbine Kaplan d'architecture classique installée dans les mêmes conditions de débit et de chute.

17. L'évaluation des dommages subis par l'anguille argentée lors de sa migration de dévalaison suppose que l'on évalue les dommages subis par la part du flux migrant transitant par les turbines, la présente étude se réfère à ce premier point. Elle suppose d'autre part que l'on soit capable d'évaluer les parts respectives du flux migrant transitant par les turbines et par les ouvrages évacuateurs, ce dernier transit se faisant le plus souvent sans dommages. Cette répartition entre turbines et ouvrages évacuateurs est déterminée par les caractéristiques de l'aménagement (caractéristiques de la prise d'eau, débit d'équipement), par les conditions hydrologiques lors des épisodes de dévalaison et par le comportement migratoire de l'anguille. Le dernier point (évaluation du taux d'échappement par le barrage au niveau d'un aménagement donné) procède de l'expertise au cas par cas et doit faire l'objet de façon prioritaire d'actions spécifiques dans le cadre du programme national R&D anguille.

Pour en savoir plus :

ONEMA - Pôle Ecohydraulique - Institut de Mécanique des fluides
Avenue du professeur Camille Soula, 31400 Toulouse
Tel. : 05 61 28 58 69 ; Télécopie : 05 61 28 58 97
Peggy Gomes : Gomes@imft.fr Michel Larinier : Larinier@imft.fr

<input type="checkbox"/>	LANGGÖL	51
<input type="checkbox"/>	KARLSNAS	52
<input type="checkbox"/>	GUSTAVSBERGS	53
<input type="checkbox"/>	EMSFORS	54
<input type="checkbox"/>	NOBBELOV	55
<input type="checkbox"/>	BROBY	56
<input type="checkbox"/>	KVARNAHOLM	57
<input type="checkbox"/>	DETTELBACH.....	58
<input type="checkbox"/>	RAYMONDVILLE	62
<input type="checkbox"/>	KLEINWALLSTADT	63
<input type="checkbox"/>	OBERNAU	64
<input type="checkbox"/>	FRANKEL.....	65
<input type="checkbox"/>	SILKEBORG.....	66
<input type="checkbox"/>	HOLSTEBRO.....	67
<input type="checkbox"/>	GUTTENBACH.....	68
<input type="checkbox"/>	LETZTEN HELLER.....	69
<input type="checkbox"/>	GEISLING	70

TABLE DES ILLUSTRATIONS

INDEX des figures

Figure 1 : Coupe transversale d'une turbine Kaplan de la centrale d'Ottmarsheim (France) (d'après Vivier, 1966)	6
Figure 2 : Schéma d'un exemple d'une turbine Kaplan sur l'aménagement d'Ottmarsheim (France) (d'après Vivier, 1966)	7
Figure 3: Situation des turbines ayant fait l'objet d'expérimentations dans le domaine d'utilisation des turbines Kaplan (points noirs : turbines Kaplan équipant des cours d'eau concernés par la dévalaison de l'anguille en France).....	16
Figure 4: Taux de mortalité en fonction du pourcentage d'ouverture de la turbine lors des essais effectués sur Linne (KEMA, 2003)	17
Figure 5 : Taux de mortalité (en %) en fonction de l'angle d'ouverture des pales lors des essais effectués sur Neckarzimmern (Berg 1986).	17
Figure 6 : Boîtes de dispersion des taux de mortalité par classe de diamètre de roue	18
Figure 7: Boîtes de dispersion des taux de mortalité par classe de vitesse de rotation	18
Figure 8 : Boîtes de dispersion des taux de mortalité par classe de débit.....	19
Figure 9 : Boîtes de dispersion des taux de mortalité par classe de taille moyenne	20
Figure 10 : Taux de mortalité en fonction des différentes tailles d'anguilles sur l'aménagement de Dettelbach (d'après Holzner, 2000)	20
Figure 11: Vue schématique d'une pale de turbine Kaplan avec le triangle des vitesses	23
Figure 12 : Comparaison des facteurs de mutilation K_v , K_t et K_a en fonction de la taille des anguilles (TL en m).....	25
Figure 13: Taux de mortalité observée et prévue par la formule RNL19 pour les essais expérimentaux.....	27
Figure 14 : Taux de mortalité observée et prévue par la formule RNL25 pour les essais expérimentaux.....	27
Figure 15 : Taux de mortalité observée et prévue par formule RR19 pour les essais expérimentaux. ..	28
Figure 16: Taux de mortalité prévue par les formules RNL19, RNL25, RR19 sur 67 turbines pour une taille d'anguille de 50 cm.....	29
Figure 17 : Taux de mortalité prévue par les formules RNL19, RNL25, RR19 sur 67 turbines pour une taille d'anguille de 70 cm.....	30
Figure 18 : Taux de mortalité prévue par les formules RNL19, RNL25, RR19 sur 67 turbines pour une taille d'anguille de 90 cm.....	30
Figure 19 : Taux de mortalité prévus par la formule de Von Raben pour les essais expérimentaux. ...	31
Figure 20 : Taux de mortalité prévus par la formule de Turnpenny pour les essais expérimentaux. ...	32
Figure 21 : Taux de mortalité prévus par la formule d'Alden pour les essais expérimentaux.	32
Figure 22 : Comparaison des taux de mortalité donnés par la formule RNL19 et prédits à partir de la probabilité de choc et des facteurs de mutilation K_v , K_t , K_a pour une taille d'anguille de 50 cm..	33
Figure 23 : Comparaison des taux de mortalité donnés par la formule RNL19 et prédits à partir de la probabilité de choc et des facteurs de mutilation K_v , K_t , K_a pour une taille d'anguille de 70 cm..	34
Figure 24 : Comparaison des taux de mortalité donnés par la formule RNL19 et prédits à partir de la probabilité de choc et des facteurs de mutilation K_v , K_t , K_a pour une taille d'anguille de 90 cm..	34
Figure 25 : Graphique des taux de mortalité obtenues lors des expérimentations de 1990, 1999 et 2002 en fonction des débits turbinés.	44
Figure 26 : Fréquence des lésions en fonction de la taille des anguilles capturées	59

Figure 27 : Répartition (en %) des lésions entre les types de lésions 1 à 5 sur l'ensemble des anguilles capturées.....	60
Figure 28 : Répartition des anguilles entrer les classes «vivantes», «presque mortes» et «mortes» immédiatement après capture au filet sur toute la durée de l'étude (de 1996 à 1999).	60

INDEX des tableaux

Tableau 1 : Données expérimentales (en grisées données utilisées pour les régressions).....	15
Tableau 2 : Tableau des moyennes pour le pourcentage de Mortalité par classe de diamètre de roue	18
Tableau 3 : Tableau des moyennes pour le pourcentage de Mortalité par classe de vitesse de rotation	18
Tableau 4 : Tableau des moyennes des pourcentages de mortalité par classe de débit.....	19
Tableau 5 : Tableau des moyennes pour le pourcentage de mortalité par classe de taille moyenne d'anguille.	19
Tableau 6 : Pourcentage d'anguilles blessées en fonction de l'angle d'ouverture des pales sur l'aménagement de Neckarzimmern	39
Tableau 7 : Tableau des effectifs des différents types de blessures sur les anguilles et du pourcentage de mortalité sur Neckarzimmern en fonction des classes de taille d'anguille.....	40
Tableau 8 : Tableau des résultats des essais réalisés sur Linne en 1990/1991	43
Tableau 9 : Tableau des résultats des essais réalisés sur Linne en 1999	43
Tableau 10 : Pourcentage de blessures infligées par les turbines sur l'anguille tous débits confondus	43
Tableau 11 : Pourcentage de blessures infligées par les turbines sur l'anguille pour différents débits en fonction des tailles d'anguilles.....	44
Tableau 12 : Tableau (synthèse) de la relation entre le taux de mortalité et le débit turbiné pour les trois expérimentations (1990, 1999 et 2002)	44
Tableau 13 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Angabäck par Monten	50
Tableau 14 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Langgöl par Monten.....	51
Tableau 15 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Karlsnas par Monten	52
Tableau 16 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Gustavsbergs par Monten ...	53
Tableau 17 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Emsfors par Monten	54
Tableau 18 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Nobbelov par Monten	55
Tableau 19 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Broby par Monten	56
Tableau 20 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Kvarnaholm par Monten	57
Tableau 21 : Taux de blessures par catégorie et taux de mortalité moyen pour des anguilles d'une longueur de 0.55 m	59
Tableau 22 : Taux de mortalité observés sur Dettelbach en fonction des tailles d'anguille	59

1. INTRODUCTION

Le règlement européen exige l'évaluation au niveau de chaque bassin des mortalités d'ordre anthropiques. Dans cette optique, l'un des chantiers consistera dans un premier temps à évaluer l'impact cumulé des centrales hydroélectriques à la dévalaison sur les différents axes de migration.

Cela passe par l'évaluation des dommages subis par l'anguille argentée lors de sa migration de dévalaison aménagement par aménagement, ce qui suppose que l'on soit capable d'évaluer :

- la part du flux migrant transitant le plus souvent sans dommages par les ouvrages évacuateurs et celle transitant par les turbines, qui est déterminée par les caractéristiques de l'aménagement (caractéristiques de la prise d'eau, débit d'équipement), par les conditions hydrologiques en période de dévalaison et par le comportement migratoire de l'anguille.

- les dommages subis par la part du flux migrant transitant par les turbines, qui sont fonction des caractéristiques des turbines, de leur condition de fonctionnement et de la taille des individus migrants.

La présente étude ne se réfère qu'au second point, c'est-à-dire l'évaluation de la probabilité de dommage subi par un individu lors du transit à travers une turbine de caractéristiques données.

Le premier point (évaluation du taux d'échappement par le barrage au niveau d'un aménagement donné) procède de l'expertise cas par cas et fait l'objet d'autres actions dans le cadre du programme national R&D.

Les dommages potentiels lors du transit à travers une turbine donnée peuvent être évalués par des expérimentations. Ces expérimentations constituent cependant des opérations très lourdes en matériel et personnel et coûteuses (entre 50 k€ et 200 k€ suivant l'importance de la turbine et la méthodologie utilisée). Elles ne peuvent être menées que sur un nombre très limité de sites. Ces dommages peuvent cependant être approchés sur une installation donnée à partir de formules prédictives établies à partir d'expérimentations effectuées sur d'autres sites ou d'extrapolation de résultats d'expérimentations effectuées sur des turbines de caractéristiques voisines.

Un premier travail (Larinier & Dartiguelongue, 1989) recensant et synthétisant les expérimentations effectuées sur l'évaluation des dommages subies par les migrateurs, en particulier les anguilles, avait été réalisé. Plusieurs expressions avaient été proposées permettant d'obtenir un ordre de grandeur des mortalités pour une turbine donnée. Des relations avaient été proposées pour les salmonidés et pour l'anguille. Cependant, pour l'anguille, les statistiques ne portaient que sur un nombre d'installations très limitées et sur des turbines de dimensions modestes.

L'objet de ce présent rapport est d'actualiser cette étude en prenant en compte les expérimentations réalisées depuis et de proposer de nouvelles relations entre le taux de mortalités et les caractéristiques des turbines.

Ce travail ne porte cependant que sur les turbines Kaplan, le nombre d'expérimentations concernant les turbines Francis étant trop limité pour pouvoir proposer une quelconque relation prédictive.

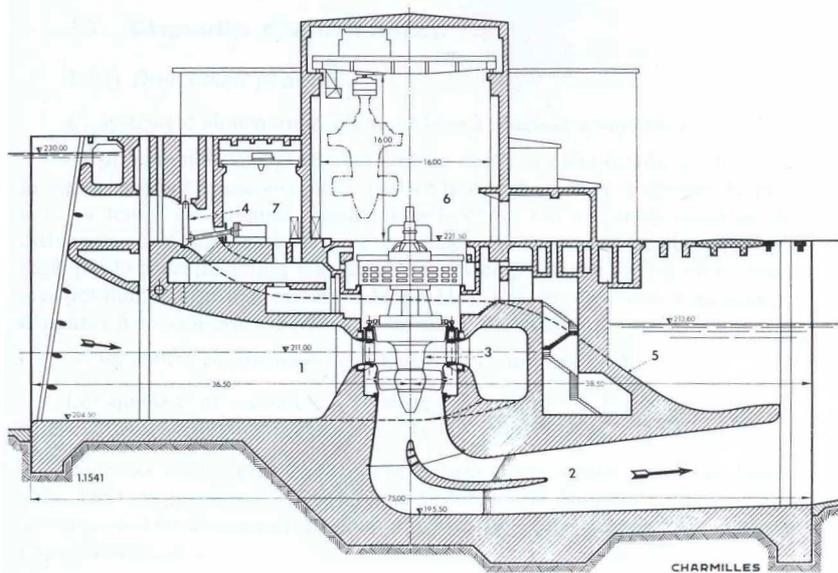
Après un bref rappel sur les caractéristiques des turbines Kaplan, on listera les facteurs susceptibles d'induire des dommages lors du passage des poissons à travers les turbines. On rappellera les principales observations ou expérimentations concernant les dommages subis par les anguilles lors de leur transit dans les turbines. Après une brève analyse des données, on proposera plusieurs relations liant le taux de mortalité aux caractéristiques des turbines et à la taille des anguilles. On donnera sous forme de fiche en annexe les références des différentes expérimentations, avec la localisation des sites, les caractéristiques des turbines testées, les méthodes expérimentales utilisées ainsi que les résultats.

2. LES TURBINES KAPLAN

Une turbine hydraulique est une machine tournante constituée principalement d'une roue mobile qui transforme l'énergie de l'eau d'un cours d'eau sous forme cinétique et/ou potentielle en énergie mécanique directement utilisable sur un arbre en rotation (Figure 1). Elle est généralement couplée à un alternateur qui débite sur le réseau d'électricité (Figure 2).

Les turbines « Kaplan » et hélices sont des machines à réaction, l'énergie en entrée de roue, c'est-à-dire à la sortie du distributeur, se trouvant en partie sous forme d'énergie cinétique et en partie sous forme d'énergie de pression. La veine liquide entre dans la roue à une pression supérieure à la pression atmosphérique et subit lors de la traversée de la roue une baisse de pression. Les turbines Kaplan comportent un nombre de pales compris entre 3 et 8, suivant la hauteur de chute de l'installation. L'orientation des pales est synchronisée avec l'ouverture du distributeur. La possibilité d'orientation des pales permet de conserver de bons rendements pour des débits variables. La roue hélice, type particulier de turbine Kaplan, possède des pales fixes ce qui rend son domaine de fonctionnement autour de son régime optimal peu étendu.

Les groupes bulbe sont des groupes Kaplan montés directement dans la conduite d'écoulement et constitués essentiellement d'une turbine axiale (l'écoulement étant axial) depuis la section d'entrée jusqu'à la section de sortie entraînant directement un alternateur fonctionnant à l'intérieur d'un carter étanche profilé en forme de bulbe. L'ensemble, dont l'axe est horizontal ou faiblement incliné, est immergé dans un conduit reliant les biefs amont et aval de l'aménagement. Cette disposition est particulièrement bien adaptée aux très basses chutes (2 à 15 m), aux grands marnages et aux gros débits. L'écoulement dans un groupe bulbe est sensiblement amélioré par rapport à celui dans une turbine Kaplan du fait de l'absence de coude au niveau du distributeur et de l'aspirateur. Il résulte de ces suppressions une augmentation notable du rendement ainsi qu'une réduction des dimensions de la machine et surtout du génie civil.



1 : Bâche spirale., 2 : Tube d'aspiration., 3 : Turbine., 4 : Clapet de déversement., 5 : Passes et coursier de restitution de 3 Clapets., 6 : Salles de machines., 7 : Salle annexe contenant les commandes des clapets et les groupes de pompage d'huile des régulateurs.

Figure 1 : Coupe transversale d'une turbine Kaplan de la centrale d'Ottmarsheim (France) (d'après Vivier, 1966)

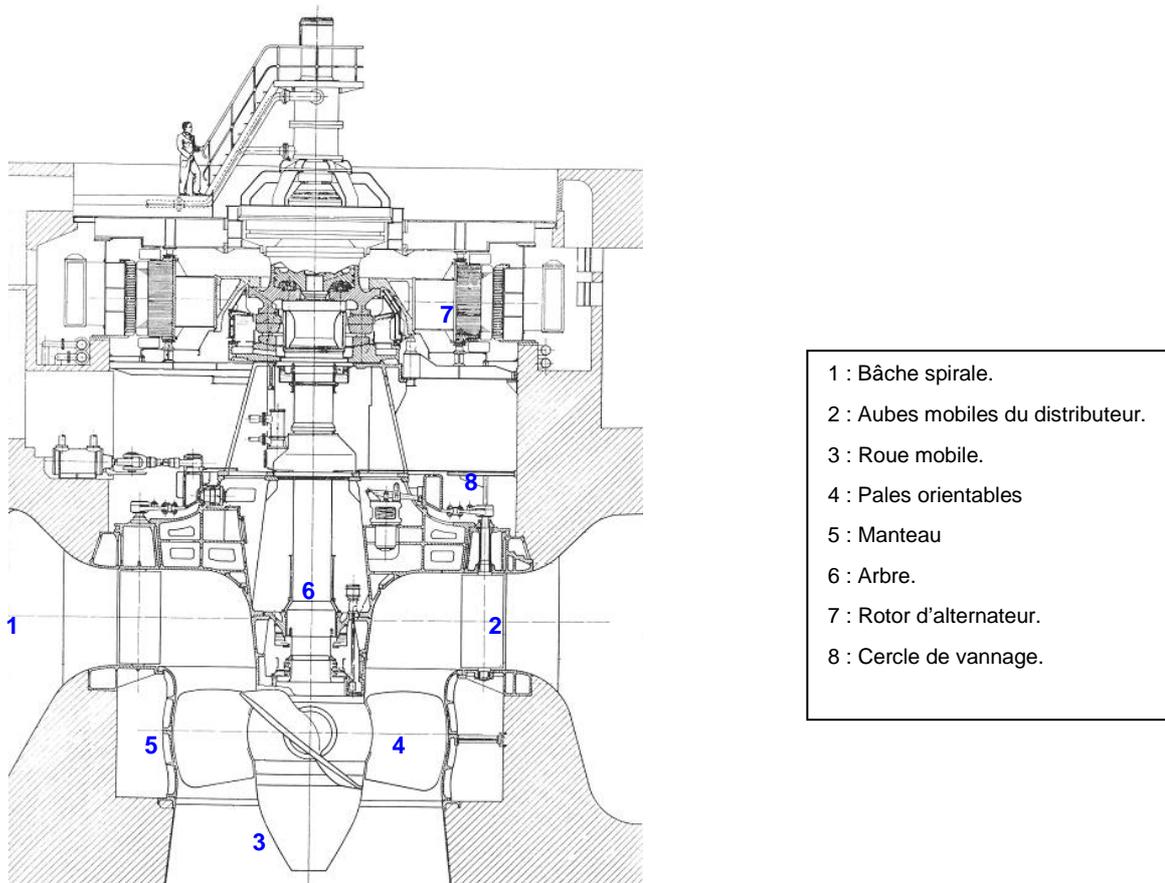


Figure 2 : Schéma d'un exemple d'une turbine Kaplan sur l'aménagement d'Ottmarsheim (France) (d'après Vivier, 1966)

Les principaux paramètres caractérisant une turbine Kaplan sont le débit nominal Q , la hauteur de chute nette nominale H , la vitesse de rotation N , les diamètres de la roue D_r et du moyeu D_m , le nombre de pales N_{ap} , et la puissance disponible sur l'arbre de la machine¹ P :

$$P = \eta \rho g Q H$$

avec η : le rendement de la turbine au point nominal

ρ : la masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3)

g : l'accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2)

L'expérience des constructeurs a permis de déterminer les dimensions et les tracés d'un certain nombre de turbines fonctionnant avec le meilleur rendement possible. A partir de ces résultats, il a été possible de dresser des catalogues contenant les caractéristiques géométriques et cinématiques de turbines de référence, chacune étant définie par sa vitesse spécifique n_s .

$$n_s = 3.45 N Q^{0.5} H^{-0.75}$$

Les n_s des turbines Kaplan sont le plus souvent compris entre 500 et 1200 trs/mn.

Pour une turbine Kaplan de conception classique équipant un site donné, caractérisé par le couple débit (Q) et chute (H), donc de puissance donnée P , la vitesse spécifique dépendra uniquement de la vitesse de rotation (N) choisie. De façon générale, pour des questions économiques, on a tendance à choisir la vitesse de rotation la plus élevée possible, l'augmentation de vitesse se traduisant par une

¹ Ne pas confondre la puissance utile P disponible sur l'arbre de la turbine (prenant en compte le rendement hydraulique de la turbine et la chute nette mise à disposition de la turbine) et la puissance maximale brute P_{MB} ($P_{MB} = 9.81 Q H$), puissance administrative définie dans toute autorisation ou concession, Q étant le débit maximum dérivé autorisé et H étant la hauteur de chute maximale définie entre la cote amont de retenue légale et le niveau minimum de la restitution

réduction des dimensions de la roue ; les problèmes de cavitation ainsi que les difficultés d'ordre mécanique dues à l'accroissement des contraintes induites par les forces centrifuges, limitent cependant les vitesses de rotation, qui doivent par ailleurs correspondre à une vitesse de synchronisme pour la fréquence de 50 Hz.

Une fois la vitesse de rotation et la vitesse spécifique fixées, toute l'architecture et les dimensions de la roue en découlent, en particulier les diamètres D_r et D_m ainsi que le nombre de pales.

Le nombre de pales peut varier de 7 à 8 pour les faibles n_s à 3 pour des n_s supérieurs à 900.

Le rapport D_m/D_r est fonction du nombre de pales, il varie entre 0.35 et 0.6 :

$$D_m/D_r = 0.177 + 0.055 Nap$$

Le moyeu de la roue prend en effet une importance croissante à mesure que le nombre de pales augmente. La raison est d'ordre constructif, le moyeu contenant le mécanisme de manoeuvre. Le fait de donner au moyeu un grand diamètre réduit l'écart des vitesses aux rayons extrêmes et conduit à des pales moins gauchies.

Les différents paramètres caractérisant une turbine sont donc plus ou moins fortement corrélés. Pour illustrer ce point, on a mis en évidence statistiquement ces relations à partir d'un échantillon de 185 turbines Kaplan équipant les cours d'eau à migrants, pour la plupart situées sur les cours d'eau français. Il convient de noter que les données sont, pour la plupart des données fournies par les propriétaires lors d'enquêtes et ne sont pas des données fabricant. Les données concernant les chutes et débits nominaux ainsi que la vitesse spécifique (calculée) sont plus ou moins précis.

On a les relations suivantes :

$$Q = 0.0086 n_s^{0.81} D_r^{2.02} H^{0.47} \quad (R^2 = 0.990)$$

$$N = 3.16 n_s^{0.58} D_r^{-1.02} H^{0.509} \quad (R^2 = 0.982)$$

En forçant les valeurs des exposants de D_r et de H dans les relations ci-dessus, on retrouve les expressions des débits réduits Q_{11} ($Q = Q_{11} H^{0.5} D_r^2$) et des vitesses réduites N_{11} ($N = N_{11} H^{0.5}/D_r$) utilisés par les turbiniers pour exprimer les courbes de rendement. N_{11} et Q_{11} étant liés par la relation $N_{11} Q_{11}^{0.5} = n_s/3.45$.

On a en effet :

$$Q = 0.0077 n_s^{0.832} D_r^2 H^{0.5} \quad (R^2 = 0.69)$$

$$N = 3.42 n_s^{0.583} D_r^{-1} H^{0.5} \quad (R^2 = 0.80)$$

Avec $Q_{11} = 0.0077 n_s^{0.832}$ et $N_{11} = 3.42 n_s^{0.583}$

soit: $N_{11} Q_{11}^{0.5} = n_s / 3.32$

Ce qui est très proche de $n_s/3.45$ (voir plus haut).

D'un point de vue pratique, la plus grande partie de la variance du diamètre étant expliquée d'abord par le débit seul puis par la vitesse de rotation, il a semblé utile de proposer les relations suivantes :

$$D_r = 3.82 N^{-0.307} Q^{0.328} \quad (R^2 = 0.985)$$

$$D_r = 0.618 Q^{0.408} \quad (R^2 = 0.954)$$

La vitesse périphérique U_1 et la vitesse axiale V_{1n} (en m/s) sont issues du calcul à partir de Q , N , D_r et D_m :

$$U_1 = \pi D_r N / 60$$

$$V_{1n} = 4 Q / \pi (D_r^2 - D_m^2)$$

Si l'on se cantonne pour la description des mortalités aux paramètres décrivant l'architecture et les conditions hydrauliques dans une turbine Kaplan de conception classique à pleine ouverture ou à débit nominal, les mortalités devraient être assez bien décrites par les trois paramètres qui déterminent les caractéristiques de la turbine, à savoir (Q , H , N) ou (D_r , H , N) sachant que Q et D_r sont des paramètres très corrélés.

3. FACTEURS DE DOMMAGES POTENTIELS SUR LES POISSONS TRANSITANT PAR UNE TURBINE.

Différents facteurs sont considérés comme pouvant être sources de lésions lors du passage dans les turbines. Même si le même type de blessures peut être attribué à des causes différentes suivant les auteurs, les dommages ont été généralement classés en quatre catégories (Larinier et Dartiguelongue, 1989) :

- les chocs et l'abrasion résultant d'un contact plus ou moins violent du poisson avec un élément fixe ou mobile de la turbine (pales, aubes du distributeur...),
- les passages dans les interstices entre les parties fixes et mobiles de la roue,
- les variations rapides de pression et la cavitation,
- les forces de cisaillement (gradients de vitesses).

Chocs et abrasion

Les contacts mécaniques peuvent se faire au niveau des pales de la roue et des directrices du distributeur. La position des directrices et des pales de la roue est fonction du degré d'ouverture de la turbine, et donc du débit qui la traverse. Cela explique le fait constaté à plusieurs reprises que la fréquence des lésions d'origine mécanique est fonction de l'ouverture de la roue.

Dans les turbines Kaplan, les vitesses relatives de l'eau par rapport aux pales augmentent du moyeu à la périphérie. La violence du choc, si choc il y a, sera d'autant plus importante que cette vitesse relative est forte. Les chocs seront donc plus violents à la périphérie de la roue qu'au voisinage du moyeu. Par contre, la turbulence est souvent plus importante au voisinage du moyeu, ce qui peut être un facteur de dommage supplémentaire.

Les dommages d'origine mécanique se manifestent (Larinier et Dartiguelongue, 1989 ; Holzner, 2000 ; Cada, 2001) :

- extérieurement par des blessures superficielles comme les abrasions, les contusions, des lacérations, des hémorragies à la base des nageoires, des fractures de la colonne vertébrale, par des blessures plus nettes comme des entailles allant jusqu'au sectionnement du poisson,
- intérieurement par des effets secondaires des chocs, comme des hémorragies dans les parois musculaires, dans divers organes ou dans la cavité générale, un dégonflement de la vessie gazeuse suite à des perforations par des arêtes.

Passages dans les interstices entre les parties fixes et mobiles de la roue

Outre les chocs, le poisson passant à la périphérie ou au moyeu est susceptible de se faire déchiqueter et sectionner (« grinding ») lorsqu'il est pris dans l'espace entre la pale et le manteau de la roue, ou entre la pale et le moyeu si cet espace est important (Odeh, 1999).

Variation de pression et cavitation

Le poisson subit une augmentation progressive de pression de la prise d'eau à l'entrée de la roue. En une fraction de seconde, au passage de la roue, il est soumis à une brutale diminution de pression, la dépression par rapport à la pression atmosphérique pouvant atteindre plusieurs mètres d'eau. Le poisson repasse progressivement à une valeur voisine de la pression atmosphérique en sortie de diffuseur.

Ces variations de pression peuvent être à l'origine de lésions :

- externes, telles exophtalmies, des saignements à la base des nageoires, hémorragies au niveau des yeux, yeux éclatés, parties du corps paraissant « mâchées » (« pulping ») en l'absence de trace d'impact.
- internes comme des hémorragies internes (organes et tissus) ou des vessies natatoires éclatées sans trace d'impact.

Les poissons tolèrent sans problème les fortes pressions et les augmentations rapides de pression. Par contre, les risques liés à une réduction brutale de pression sont tout autres : toute réduction de pression se traduit par une augmentation du volume de la vessie natatoire. Tant que la réduction de pression n'excède pas 50-60% de la valeur initiale, il ne semble pas y avoir de risque d'éclatement de la vessie natatoire. Par contre, au-delà de cette limite, toute diminution de pression peut être dommageable si elle s'effectue à une vitesse supérieure au taux d'élimination ou de réabsorption du gaz excédentaire. Le risque de rupture de la vessie est beaucoup moins grand sur les espèces physostomes (salmonidés, anguille...), qui peuvent évacuer très rapidement par la bouche le gaz en excès par le canal pneumatique, que chez les espèces physoclistes (percidés) chez qui la régulation gazeuse est beaucoup plus lente. Ce ne sont donc pas les fortes valeurs des pressions atteintes qui génèrent les lésions, mais plutôt les diminutions brusques à partir de ces pressions (Larinier et Dartiguelongue, 1989 ; Odeh, 1999 ; Cada, 2001).

On évoque souvent les dommages causés par la cavitation. Les expérimentations en laboratoire n'ont jamais apporté de résultats tangibles sur ce point.

Forces de cisaillement

Le cisaillement correspond au déplacement l'une par rapport à l'autre de deux masses d'eau contiguës à vitesses très différentes. Ce phénomène se produit naturellement dans tous les écoulements mais peut être exacerbée au pied de chutes naturelles ou artificielles, dans les turbines, plus généralement en périphérie de jets à très fortes vitesses.

Les forces de cisaillement dus aux gradients de vitesses sont souvent citées comme source de blessures dans les turbines.

Les blessures attribuées au cisaillement se caractérisent par des ecchymoses, des opercules retournés ou arrachés, des arcs branchiaux brisés, des isthmes rompus, voire la séparation de toute la tête (Larinier et Dartiguelongue, 1989 ; Cada, 2001).

4. LES DOMMAGES OBSERVES SUR LES ANGUILLES

Avec le développement de l'hydroélectricité sur les cours d'eau, les observations d'anguilles blessées ou mortes à l'aval de centrales hydroélectriques se sont multipliées et la constatation des dommages induits par les turbines sur l'anguille n'est pas un fait récent (Baar, 1903 et Gerhardt, 1893 ; cité dans Holzner, 2000). Certaines observations proviennent de pêcheurs professionnels qui récupèrent dans leurs engins des anguilles mortes ou encore vivantes mais plus ou moins gravement endommagées. En 1927, Lundbeck (cité dans Holzner, 2000) mentionne lors du pic de migration des «turbines littéralement bloquées par des anguilles tronçonnées».

Ces observations sont à l'origine des premières expérimentations entreprises pour évaluer les dommages subis par l'anguille argentée lors de son transit par les turbines.

Au Danemark, les premières expérimentations visant à évaluer les dommages dans les turbines ont été entreprises à partir des années 1930 (Otterstrøm, 1936). En 1942, les dommages constatés sur les anguilles au passage de la turbine Kaplan de la centrale d'Holstebro (diamètre 1.50 m, vitesse de rotation 214 trs/mn) ont été tels que l'office de la pêche recommandait de capturer les anguilles argentées en amont de l'usine et de les transporter en aval, alors que les dommages étaient considérés comme acceptables sur les smolts de saumons et de truite (Otterstrøm, 1942).

Lors des expérimentations menées à la centrale d'Obernau en Allemagne en 1927 (Von Raben , 1955 / 1957a / 1957b), des taux de blessure sur l'anguille de l'ordre de 18-20% ont été mentionnés. C'est sur la base de ces essais que Von Raben a développé la première modélisation destinée à prédire les pourcentages de blessures occasionnées par une turbine de caractéristiques données.

Butschek & Hofbauer (1956) ont effectués une expérimentation au niveau de la centrale de Kleinwallstadt sur le Main équipée de deux turbines Kaplan. Des anguilles marquées ont été injectées à l'aval immédiat des grilles de la centrale et ont été récupérées en aval à l'aide d'un Shokker² dans le canal de fuite. Suite aux lésions constatées (de l'ordre de 14%), des indemnités compensatoires ont été demandées aux exploitants des centrales hydroélectriques (Holzner, 2000).

Monten (1985), a effectué en Suède de nombreuses expérimentations portant sur des salmonidés et l'anguille. Il a mis en évidence sur plusieurs aménagements équipés de turbines Kaplan des taux de blessures sur l'anguille variant de 26% à 100%. Les forts taux de mortalité ont été observés sur des turbines présentant des vitesses de rotation importantes et des faibles diamètres.

Berg (1985a) a enregistré, au niveau d'une centrale sur le Neckar (Neckarzimmern : turbine Kaplan à cinq pales, roue 4.2 m, 83.4 trs/min), des taux de lésions sur des anguilles compris entre 20% et 50%, les valeurs maximales de mortalité étant atteintes pour les faibles ouvertures.

En 1987, dans le cadre d'essais réalisés sur la Werra à la centrale de Letzten Heller (turbine Straflo à quatre pales, hauteur de chute de 3.77 m, diamètre de la roue de 2.41 m, 142 trs/min), Berg (1987b) a enregistré un taux de mortalité de 8.6% pour des anguilles d'une taille moyenne de 0.45 m.

Berg (1994b) a réalisé de nouvelles expérimentations sur une turbine bulbe horizontale à trois pales (hauteur de chute 5.3 m, diamètre 3.6 m, 130 trs/min). La mortalité moyenne observée a été de 30.4%. Les données collectées ont permis d'établir un lien très net entre l'ouverture de la roue et le taux de mortalité (de 27.3 % pour 63 m³/s à 61.5 % pour 35 m³/s).

Wondrak (1989) en collaboration avec les pêcheurs professionnels encore très actifs sur le Main, a collecté des données sur les lésions des anguilles. Il a étudié les anguilles capturées par des shokkers en aval des centrales de Harrbach et Klingenberg. Les taux moyens de mortalités après trois semaines de stabulation étaient compris entre 54% et 87%.

Seifert (1989) (cité dans Holzner, 2000) a enregistré, en aval de la centrale de Geisling sur le Danube (turbines Kaplan, roue de 5.35 m, hauteur de chute de 6.05 m, roue à quatre pales, 78.95 t/min) à partir des prises effectuées par des shokkers, des taux de lésions compris entre 42 et 50 %. Un lien très net a été établi entre l'ouverture de la turbine et le pourcentage de dommages : les taux de blessure étaient inversement proportionnels au degré d'ouverture de la turbine. Le pourcentage d'anguilles sectionnées augmentait avec la longueur des poissons. Mais par contre les ruptures de la colonne étaient proportionnellement plus fréquentes chez les anguilles les plus petites. L'auteur a fait

² Embarcation à voile utilisée aux Pays Bas et en Allemagne pour la pêche de l'anguille argentée.

l'hypothèse que les grands individus résistaient mieux aux impacts que les petits. L'efficacité des captures par skokker n'est cependant pas connue.

Schultze (1990) a enregistré, pour les turbines Kaplan de la centrale de Wahnhausen sur la Fulda (hauteur de chute 8.5 m, diamètre 3.3 m, 150 trs/min), des taux de lésions pour les anguilles pouvant atteindre 85%, les taux de recapture très faibles des anguilles après passage dans la centrale, compris entre 19% et 21%, relativisent cependant la signification des résultats.

Lors d'opérations de pêches à l'aide d'un shokker dans le canal de fuite de l'aménagement de Frankel équipé de turbines Kaplan à 4 pales (chute brute 6 m, diamètre 4.5 m, 80 tr/min) situé sur la partie allemande de la Moselle, Jörgensen et al. (1999) ont estimé la mortalité moyenne, toutes tailles d'anguilles confondues, à 23%. Les opérations de pêche se sont déroulées pour des débits très variables. Lorsqu'on examine les résultats des pêches où les nombres d'individus recapturés étaient significatifs, on s'aperçoit que la variabilité des mortalités enregistrées est importante : le taux de mortalité varie de 14% à 47%, la valeur médiane se situant à 25%. Le pourcentage de mortalité moyen de 23% associe des transits dans des turbines fonctionnant à pleine ouverture et à ouverture partielle. Lors du pic de migration (capture de 67% du total des captures sur la période de pêche de 100 jours), le taux de mortalité enregistré a été de 19%, les turbines fonctionnant très probablement à pleine ouverture, dans la mesure où le débit de la Moselle était alors largement supérieur au débit d'équipement de l'usine.

Les expérimentations les plus approfondies ont été réalisées par Holzner (2000) dans le cadre d'une thèse de doctorat à la centrale de Dettelbach sur le Main en Allemagne, centrale équipée de deux turbines Kaplan verticales à 4 pales (hauteur de chute 4.65 m, débit maximal 60 m³/s, diamètre 3.54 m, 100 trs/min). De l'automne 1996 à l'automne 1998, une expérimentation visant à évaluer les dommages des poissons lors de leur passage à travers ces turbines a été réalisée sous la direction scientifique du département Biologie des poissons de l'université de Munich, pour le compte de la société Bayernwerk Wasserkraft AG, des ministères bavarois de l'agriculture et de l'environnement. Les poissons transitant naturellement par les turbines ont été capturés à l'aide de grands filets fixés en sortie d'aspirateur et filtrant la totalité du débit de la turbine. Pour déterminer le taux de mortalité global, les individus capturés vivants ont été conservés en captivité de 24 à 96 heures, et ont fait l'objet d'examen minutieux et/ou d'autopsie afin de déterminer l'origine des mortalités et des blessures et d'apprécier s'ils étaient viables ou non. Sur la période comprise entre octobre 1996 et octobre 1999, les pêches ont couvert 122 jours, hors plusieurs périodes de crues qui ne permettaient pas de pêcher dans des conditions de sécurité satisfaisantes. Au total, 32 407 poissons de 28 espèces dont 3718 anguilles ont été capturés. Les mortalités quasi-immédiates sur l'anguille ont été estimées à 23%, toutes tailles confondues, auxquelles il convient de rajouter 5% correspondant à des anguilles encore vivantes au bout de quelques jours mais considérées comme non viables à terme (par exemple des anguilles présentant des fractures de la colonne vertébrale, à mobilité réduite mais encore vivantes au bout de 3 semaines), soit un taux de mortalité global de 28%. 24% des individus présentaient des blessures et saignements externes, 13% des fractures ou lésions visibles de l'épine dorsale, 6% des sectionnements partiels et 4% des sectionnements totaux. L'importance des dommages est très nettement liée à la taille des anguilles. La plus grande partie des captures a été réalisée avec des ouvertures importantes des turbines.

Des expérimentations réalisées sur la Meuse à la centrale de Linne (KEMA, 1992 ; Hadderingh et Bakker, 1998 ; Hadderingh et Bruijs, 2002 ; Bruijs et al. (KEMA, 2003)) en 1990/1991, 1999 et 2002 par capture au filet, ont mis en évidence des taux de mortalité sur l'anguille variant de 5.5% à 27% selon l'ouverture de la turbine et la taille des anguilles. A pleine ouverture, la mortalité observée a été de 5.5% en 1990 et de 9% en 1999, et. En 2002, Bruijs et al. (KEMA, 2003) estiment à 24 % le taux des blessures infligées par la turbine, toutes ouvertures confondues, sur des anguilles de tailles moyennes de 65 cm. Les dommages ont été classés en huit catégories, allant de l'absence de dommage au sectionnement total. Les taux de mortalité ont été déterminés en se basant sur la proportion des anguilles retrouvées mortes dans le filet auxquelles ont été rajoutées des anguilles encore en vie mais considérées comme non viables à terme (en particulier les individus ayant subi des dommages sévères à la colonne vertébrale, pouvant survivre mais incapables d'effectuer leur migration de reproduction suite à leur mobilité réduite).

Les expérimentations ont été poursuivies en 2002 et 2004 (KEMA, 2003 ; Winter et al., 2006 ; Winter et al., 2007) aux aménagements de Linne et Alphen sur la Meuse afin de quantifier les dommages

cumulés (par pêche et par passage dans les turbines). La technique du Nedap Trail System³ a permis de suivre lors de chacune de ces deux campagnes 150 anguilles (taille moyenne de 74.5 cm) marquées avec un transpondeur. Ces expérimentations ont permis de constater que la méthode par télémétrie sous-estimait largement la mortalité dans la mesure où elle ne permettait de ne prendre en compte dans les mortalités que les anguilles restant au pied de l'ouvrage. Une proportion non négligeable des anguilles transitant par les turbines peut continuer à dévaler un certain temps et franchir plusieurs obstacles avant de mourir. Les auteurs ont estimé que, sur les deux ouvrages, la mortalité globale sur les anguilles marquées (mortalité immédiate et différée) variait entre 16 % et 26% en 2002 et entre 25% et 34% en 2004, même si les mortalités immédiates constatées en pied d'usine n'étaient que de 9% en 2002 et 21% en 2004.

Desrochers (1995) a estimé lors de tests effectués sur une turbine Kaplan au barrage de Beauharnois sur le Saint-Laurent (turbine à six pales, hauteur de chute 23.8 m, diamètre 6.39 m, 94.7 trs/min), un taux de mortalité, après 48 heures, de 24% sur des anguilles dont la longueur moyenne était de 88 cm. Le taux d'anguilles sectionnées était de 14.5%.

Un taux de mortalité de 26.5% (après 88h) a été enregistré pour des anguilles d'une longueur moyenne de 102 cm passant au travers d'une turbine hélice (turbine à six pales, hauteur de chute 24.6 m, diamètre 6.1 m, 94.7 trs/min) au barrage Moses-Saunders (Saint-Laurent) (Normandeau Associates Inc. & Skalski, 1998, Normandeau Associates Inc. *et al.*, 2000).

Les mortalités induites par les aménagements de Moses-Saunders et Beauharnois représenteraient presque 75 % de la mortalité d'origine anthropique qui survient pendant l'avalaison et réduirait de 40% l'échappement des géniteurs, cette estimation ne portant que sur la partie du bassin du Saint-Laurent située en amont du barrage de Beauharnois. Ces chiffres doivent être considérés comme des minimums en raison des blessures non mortelles, non détectées mais susceptibles de réduire le nombre de femelles qui réussiront à atteindre la mer des Sargasses pour s'y reproduire (Couillard *et al.*, 1997).

En conclusion, les observations et expérimentations montrent que les dommages sur les anguilles sont notables, même sur les turbines Kaplan de grand diamètre. Ils sont généralement supérieurs à 15-20%. La variabilité des taux de dommages semble d'autre part très importante sur une turbine donnée. Les facteurs d'origine mécanique (chocs, abrasion, passage dans les interstices pales-manteau) apparaissent comme les principaux facteurs de dommages. Les blessures les plus souvent observées sont des sectionnements totaux, des sectionnements partiels ou autres blessures externes ainsi que des déformations importantes, voire des ruptures de la colonne vertébrale sans blessure externe. La grande résistance physique de l'anguille, les faisant paraître indemnes suite au passage par la turbine, a été notée par plusieurs auteurs. Lors des expérimentations, le maintien d'anguille en stabulation, même pendant des périodes assez longues après leur passage dans une turbine, réduit le biais résultant de la mortalité différée, mais ne tient pas compte des effets sub-létaux sur le comportement, la migration et la survie à terme.

³ Le NEDAP TRAIL System[®] est une méthode de télémétrie, basée sur le couplage inductif entre une antenne boucle (composé de trois câbles parallèles) placé sur le fond d'un cours d'eau et la tige de ferrite d'une antenne intégrée dans une marque de type transpondeur. Le système se compose de transpondeurs actifs (implantés dans les poissons) chacun transmettant un code unique, et un réseau de stations de détection fixes

5. DONNEES EXPERIMENTALES

Sur la vingtaine d'études sur le transit des anguilles par les turbines Kaplan réalisées pour la plupart en Europe (Allemagne et Suède), on a regroupé, analysé et sélectionné les expérimentations pouvant être exploitées par un traitement statistique. Une fiche par aménagement est présentée en annexe I.

Les informations extraites des différentes expérimentations et portées dans ces fiches sont les suivantes:

- Le nom de l'aménagement, la localisation, la source bibliographique.
- Les caractéristiques de la turbine (la hauteur de chute, le débit à pleine ouverture, le diamètre de la roue, la vitesse de rotation, le nombre de pales, etc.).
- La méthodologie expérimentale utilisée pour estimer les dommages : récupération à l'aide d'un filet de la population transitant naturellement par la turbine ou d'individus introduits artificiellement ; ou encore introduction de poissons marqués (émetteurs radio, marques flottantes, ballons en latex) à l'amont immédiat de la roue et récupérés dans le canal de fuite à l'aide d'un dispositif de capture adapté,
- La taille moyenne ou la classe de taille des individus,
- Le nombre de poissons relâchés (test et contrôle),
- Les différentes conditions d'essai quand elles étaient disponibles (ouverture de la roue, taille des lots d'anguilles...),
- Le taux de recapture (lots tests et contrôles).
- Le taux de mortalité immédiate et après délais.

Sur l'ensemble de ces expérimentations, n'ont été retenus que 71 essais pour lesquels on disposait d'informations suffisantes sur la géométrie de la roue et sur les conditions de fonctionnement (en particulier le pourcentage d'ouverture de la turbine). Le Tableau 1 récapitule les données qui ont semblé exploitables au sein des expérimentations décrites dans les fiches données en annexe I.

Il nous a semblé utile d'inclure dans ce tableau les données concernant les sites de Raymondville, Kleinwallstadt, Obernau et Frankel pour lesquels existaient des données intéressantes sur les dommages bien qu'incomplètes (ouverture des turbines et/ou taille des anguilles non disponibles).

Pour chaque essai réalisé par Monten (1985), deux lignes ont été portées dans le tableau : le pourcentage de mortalité peut en effet être calculé en rapportant le nombre d'individus morts au nombre d'individus lâchés ou au nombre d'individus recapturés. Ces deux pourcentages peuvent être très significativement différents pour certains essais lorsque les taux de recapture sont limités. L'évaluation du pourcentage de mortalité en se rapportant au nombre de poissons récupérés a tendance à majorer les taux de mortalité, l'expérience montrant que les taux de recapture sont généralement plus élevés avec la technique de la recapture par filet sur les poissons morts que sur les poissons vivants. Pour éviter le risque de surestimation des dommages dans les formules prédictives, n'ont été prises en compte que les données où l'on a fait l'hypothèse que les anguilles non récupérées suite à leur passage dans les turbines étaient vivantes.

On a porté sur la Figure 3 les caractéristiques (hauteur de chute, débit maximal) des turbines ayant fait l'objet de tests ainsi que celles d'un échantillon de 200 turbines Kaplan équipant les cours d'eau à migrants ; l'examen de ce graphique permet de situer l'échantillon étudié à l'intérieur du domaine d'utilisation classique des turbines Kaplan.

On peut constater une sous-représentation des turbines de puissances inférieures à 500 kW fonctionnant sous très basses chutes (<3-4 m) et turbinant des débits relativement faibles (<15-20 m³/s) ainsi que des grosses turbines de 10 à 50 MW à débits de l'ordre de 150-400 m³/s fonctionnant sous 10-20 m de chute. La plupart des turbines testées comportent 4 pales.

Tableau 1 : Données expérimentales (en grisées données utilisées pour les régressions)

num	SITE	CODE	P	H	Nap	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
1	Neckarzimmern	NECK1	3.68	5.3	5	4.2	83.4	18.3	2.64	80	25	0.62	100
2	Beauharnois	BEAU1	54.7	23.8	6	6.39	94.7	31.5	3.35	265	23.9	0.881	92
3	Linne	LINN3	2.87	4	3	4	88.23	18	4.19	100	22.8	0.489	30
4	Linne	LINN2	2.87	4	3	4	88.23	18	4.19	100	9.9	0.591	50
5	Linne	LINN1	2.87	4	3	4	88.23	18	4.19	100	5.5	0.598	100
6	Linne	LINN6	2.87	4	3	4	88.23	18	4.19	100	25	0.608	30
7	Linne	LINN5	2.87	4	3	4	88.23	18	4.19	100	16	0.628	50
8	Linne	LINN4	2.87	4	3	4	88.23	18	4.19	100	9	0.647	100
9	Linne	LINN9	2.87	4	3	4	88.23	18	4.19	100	26.97	0.633	30
10	Linne	LINN8	2.87	4	3	4	88.23	18	4.19	100	18.97	0.639	50
11	Linne	LINN7	2.87	4	3	4	88.23	18	4.19	100	42.9	0.753	95
12	Linne	LINN10	2.87	4	3	4	88.23	18	4.19	100	24.32	0.65	62.5
13	Haandrick	HAAN1	0.1	2	4	1.6	150	13	1.26	7	24	0.47	100
14	Alphen/Lith	LITH1	4.3	4.6	3	4	94	19.7	4.19	120	19	0.55	
15	Robert Moses St Law	FDR1	57	24.6	6	6.096	94.7	29.6	3.19	275	25	1.02	100
16	Ångabäck	ANG1	2.11	6	4	3.3	125	21.6	2.59	60	63	0.735	67
17	Ångabäck	ANG2	2.7	6	4	3.3	125	21.6	2.59	60	45	0.735	83
18	Ångabäck	ANG3	3.17	6	4	3.3	125	21.6	2.59	60	40	0.735	100
19	Ångabäck	ANG10	2.11	6	4	3.3	125	21.6	2.59	60	44	0.735	67
20	Ångabäck	ANG20	2.7	6	4	3.3	125	21.6	2.59	60	26	0.735	83
21	Ångabäck	ANG30	3.17	6	4	3.3	125	21.6	2.59	60	38	0.735	100
22	Langgöl	LANG1	0.558	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	12	80.8	0.565	46
23	Langgöl	LANG2	0.558	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	12	75	0.565	100
24	Langgöl	LANG3	0.558	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	12	89.8	0.735	46
25	Langgöl	LANG4	0.558	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	12	97.8	0.735	100
26	Langgöl	LANG10	0.558	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	12	76	0.565	46
27	Langgöl	LANG20	0.558	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	12	72	0.565	100
28	Langgöl	LANG30	0.558	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	12	76	0.735	46
29	Langgöl	LANG40	0.558	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	12	90	0.735	100
30	Karlsnäs	KARL1	0.583	6	4	1.6	250	21	1.26	13	88	0.735	85
31	Karlsnäs	KARL2	0.583	6	4	1.6	250	21	1.26	13	83	0.735	92
32	Karlsnäs	KARL3	0.583	6	4	1.6	250	21	1.26	13	86	0.735	88.5
33	Karlsnäs	KARL10	0.583	6	4	1.6	250	21	1.26	13	52.8	0.735	85
34	Karlsnäs	KARL20	0.583	6	4	1.6	250	21	1.26	13	56	0.735	92
35	Karlsnäs	KARL30	0.583	6	4	1.6	250	21	1.26	13	53.9	0.735	88.5
36	Gustavsberg	GUST1	0.325	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	11	99	0.735	29
37	Gustavsberg	GUST2	0.609	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	11	98	0.735	54
38	Gustavsberg	GUST3	0.842	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	11	100	0.735	75
39	Gustavsberg	GUST4	0.964	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	11	91	0.735	86
40	Gustavsberg	GUST5	0.903	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	11	94	0.735	80
41	Gustavsberg	GUST10	0.325	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	11	68	0.735	29
42	Gustavsberg	GUST20	0.609	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	11	74	0.735	54
43	Gustavsberg	GUST30	0.842	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	11	100	0.735	75
44	Gustavsberg	GUST40	0.964	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	11	87	0.735	86
45	Gustavsberg	GUST50	0.903	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	11	91.4	0.735	80
46	Emsfos	EMSF1	0.662	6	4	1.95	187	19.1	1.53	22	63	0.565	57
47	Emsfos	EMSF2	0.662	6	4	1.95	187	19.1	1.53	22	75	0.735	87
48	Emsfos	EMSF10	0.662	6	4	1.95	187	19.1	1.53	22	40	0.565	57
49	Emsfos	EMSF20	0.662	6	4	1.95	187	19.1	1.53	22	47.5	0.735	87
50	Nöbbelöv	NOBB1	1.45	10	4	1.94	250	21	1.52	23	83.8	0.735	72
51	Nöbbelöv	NOBB2	1.98	10	4	1.94	250	25.4	1.52	23	72.8	0.735	98
52	Nöbbelöv	NOBB10	1.45	10	4	1.94	250	21	1.52	23	45	0.735	72
53	Nöbbelöv	NOBB20	1.98	10	4	1.94	250	25.4	1.52	23	67.5	0.735	98
54	Broby	BROB1	1.35	9	4	2.06	250	27	1.62	23	81.2	0.735	74
55	Broby	BROB2	1.35	9	4	2.06	250	27	1.62	23	73.8	0.735	96
56	Broby	BROB10	1.35	9	4	2.06	250	27	1.62	23	64.6	0.735	74
57	Broby	BROB20	1.35	9	4	2.06	250	27	1.62	23	65	0.735	96
58	Kvarnaholm	KVAR1	1.98	7.5	4	3	150	23.6	2.36	50	92	0.735	60
59	Kvarnaholm	KVAR2	2.64	7.5	4	3	150	23.6	2.36	50	51	0.735	80
60	Kvarnaholm	KVAR3	3.3	7.5	4	3	150	23.6	2.36	50	61	0.735	100
61	Kvarnaholm	KVAR10	1.98	7.5	4	3	150	23.6	2.36	50	73.3	0.735	60
62	Kvarnaholm	KVAR20	2.64	7.5	4	3	150	23.6	2.36	50	38.1	0.735	80
63	Kvarnaholm	KVAR30	3.3	7.5	4	3	150	23.6	2.36	50	54.2	0.735	100
64	Dettelbach	DETT1	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	28	0.55	≥70
65	Dettelbach	DETT2	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	12	0.3	≥70
66	Dettelbach	DETT3	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	10	0.4	≥70
67	Dettelbach	DETT4	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	19	0.5	≥70
68	Dettelbach	DETT5	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	25	0.6	≥70
69	Dettelbach	DETT6	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	47	0.7	≥70
70	Dettelbach	DETT7	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	53	0.8	≥70
71	Dettelbach	DETT8	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	60	0.9	≥70
72	Raymondville	RAYM1	2.4	6.6	6	3.33	120	21	1.74	46	37	0.625	
73	Kleinwallstadt	WALL1	1.82	3.19	4	4.49	68	16	3.53	51	14	0.625	
74	Obernau	OBER1	1.7	2.98	4	4.49	68	19.5	3.53	71	20	0.55	
75	Frankel	FRAN1	4.7	6.04	4	4.6	80	19.3	3.61	100	19		100

Remarque : Les lignes grisées concernent uniquement les essais pour une ouverture > 70%

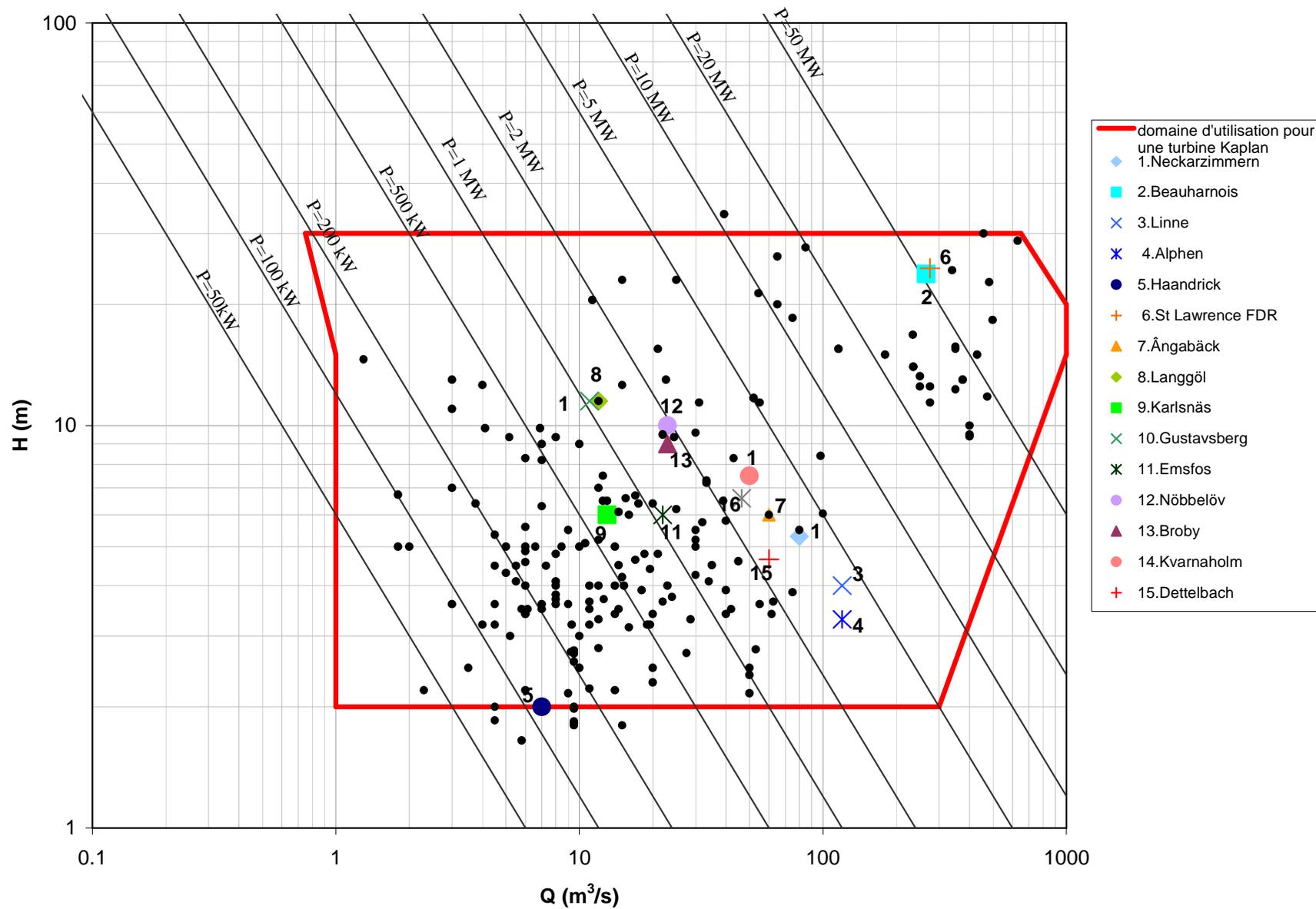


Figure 3: Situation des turbines ayant fait l'objet d'expérimentations dans le domaine d'utilisation des turbines Kaplan (points noirs : turbines Kaplan équipant des cours d'eau concernés par la dévalaison de l'anguille en France)

6. ANALYSE SUR LES DONNEES EXPERIMENTALES DES FACTEURS INFLUENÇANT LA MORTALITE

6.1. Plage de variation des mortalités

Si on considère l'ensemble des 75 essais, toutes ouvertures confondues, le taux de mortalité moyen est de 51.9% (médiane = 52.8%, $Q_{25}^4=25\%$ et $Q_{75}=75\%$), il varie de 5.5% à 100.00%.

Les expérimentations mettent en évidence l'influence de certains paramètres sur les dommages, comme les conditions de fonctionnement de la turbine, les caractéristiques de la turbine (diamètre, débit, vitesse de rotation, ...) et la taille de l'anguille.

6.2. Influence de l'ouverture de la turbine sur le taux de mortalité des anguilles.

Les expériences menées à Linne (Figure 4) et Neckarzimmern (Figure 5) mettent en évidence que la mortalité diminue avec l'ouverture de la roue. Comme on l'a noté plus haut, cela peut s'expliquer par le fait que la probabilité de choc du poisson contre les pales est d'autant plus forte que l'espacement entre pales est réduit.

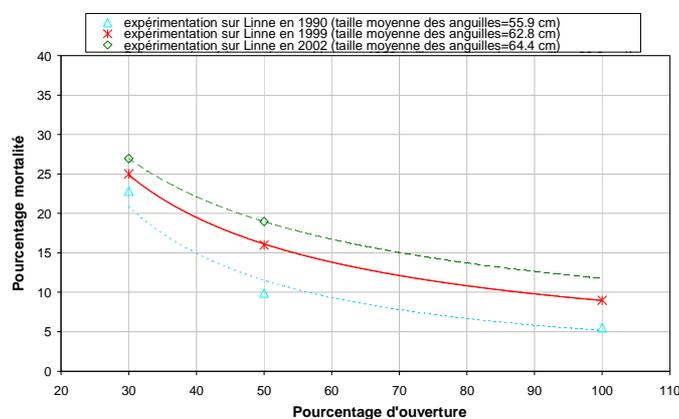


Figure 4: Taux de mortalité en fonction du pourcentage d'ouverture de la turbine lors des essais effectués sur Linne (KEMA, 2003)

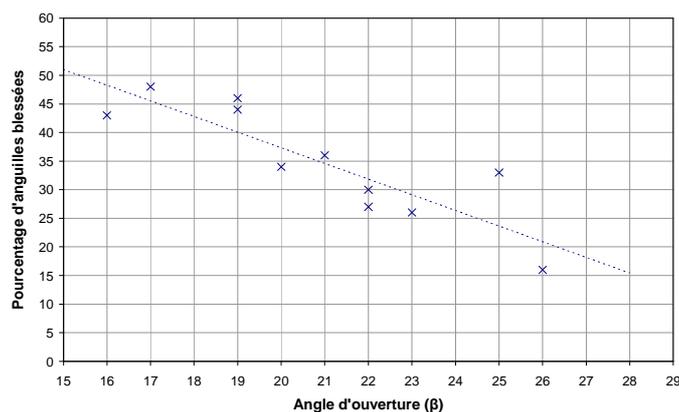


Figure 5 : Taux de mortalité (en %) en fonction de l'angle d'ouverture des pales lors des essais effectués sur Neckarzimmern (Berg 1986).

Pour mettre plus facilement en évidence l'influence des autres paramètres on s'est limité dans la suite aux essais effectués pour une ouverture de la turbine supérieure à 70% (lignes en grisé portées sur le Tableau 1). La valeur moyenne de la mortalité est alors de 43.5% (médiane=45%, $Q_{25}=24\%$ et $Q_{75}=60\%$).

⁴ Q_{25} : premier quartile et Q_{75} : troisième quartile

6.3. Influence du diamètre de la roue sur le taux de mortalité des anguilles

Les diamètres des roues des turbines testées varient entre 1.3 m et 6.4 m (moyenne environ 3 m).

Le Tableau 2 et la Figure 6 mettent en évidence une différence significative entre les moyennes du taux de mortalité entre chaque classe de diamètre, la mortalité est d'autant plus importante que le diamètre de la roue est faible.

Tableau 2 : Tableau des moyennes pour le pourcentage de Mortalité par classe de diamètre de roue

Diamètre de la roue (m)	[1.3-1.5 [	[1.5-2.5 [	[2.5-3.5 [	[3.5-4.5 [	[5.5-6.5 [	Total
Effectif	4	8	4	11	2	29
Moyenne du taux de mortalité	87.2	52.8	39.1	25.9	24.4	43.5

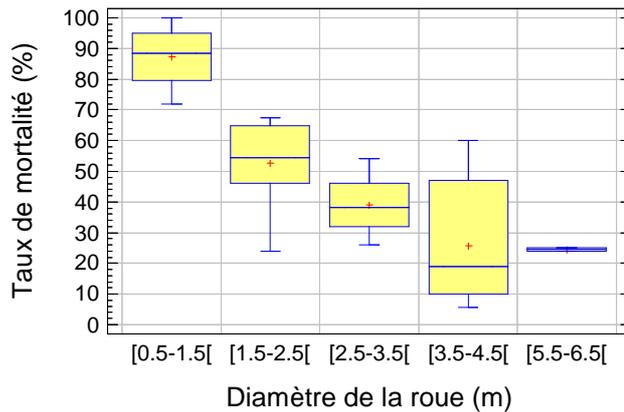


Figure 6 : Boîtes de dispersion des taux de mortalité par classe de diamètre de roue

6.4. Influence de la vitesse de rotation sur le taux de mortalité des anguilles

Les vitesses de rotation des roues testées varient de 83.4 trs/mn à 375.0 trs/mn.

On constate (Figure 7 et Tableau 3) que la mortalité a tendance à augmenter avec la vitesse de rotation, les moyennes de taux de mortalité observées de chaque classe de vitesse de rotation étant significativement différentes.

Tableau 3 : Tableau des moyennes pour le pourcentage de Mortalité par classe de vitesse de rotation

Vitesse de rotation (trs/min)	[80-100[	[100-200[	[200-300[	[300-400[	Total
Effectif	6	13	6	4	29
Moyenne du taux de mortalité	17.9	34.9	58.5	87.2	43.5

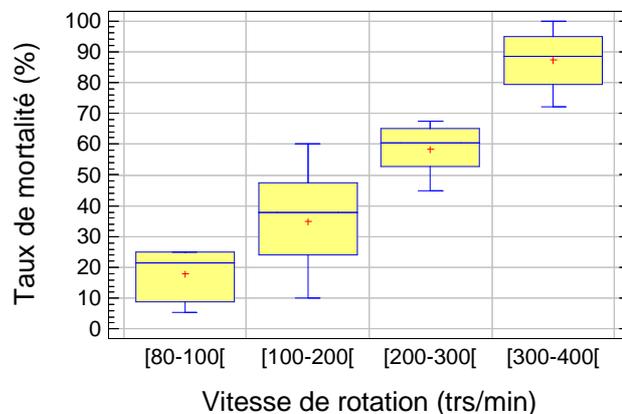


Figure 7: Boîtes de dispersion des taux de mortalité par classe de vitesse de rotation

6.5. Influence du nombre de pales sur le taux de mortalité des anguilles

Il n'est pas possible de mettre en évidence l'influence du nombre de pales sur la mortalité, la plupart des essais ayant été effectués sur des turbines à 4 pales (23 essais sur 29), les quelques essais sur des turbines à 3 ou 5-6 pales portent sur de très grosses turbines.

6.6. Influence du débit sur le taux de mortalité des anguilles

Sur 29 essais, le débit maximal des turbines varie de 7 m³/s à 275 m³/s (moyenne de 61.1 m³/s), avec une médiane à 60 m³/s (Q25= 22 m³/s et Q75=60 m³/s)

Le Tableau 4 et la Figure 8 montrent que la mortalité a tendance à diminuer avec le débit. Le diamètre de la roue et le débit étant deux paramètres fortement corrélés, il est évident que ces deux paramètres ont des influences similaires sur la mortalité (voir Figure 6).

Tableau 4 : Tableau des moyennes des pourcentages de mortalité par classe de débit

Débit (m ³ /s)	[7-20[	[20-40[	[40-60[	[60-130[	[200-300[	Total
Effectif	7	5	2	13	2	29
Moyenne du taux de mortalité	68.83	57.92	46.15	26.80	24.45	43.49

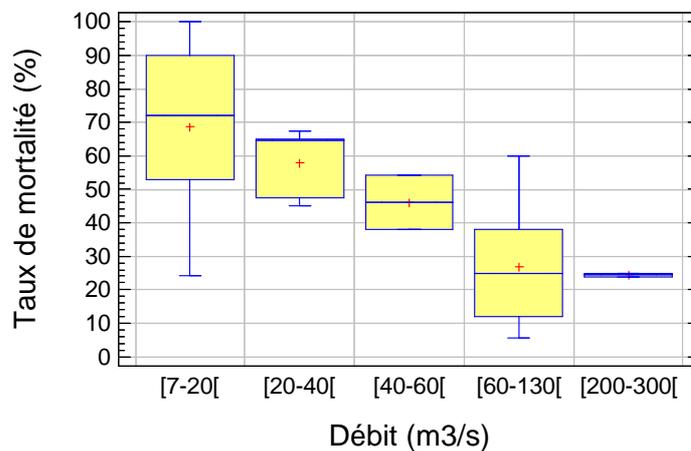


Figure 8 : Boîtes de dispersion des taux de mortalité par classe de débit.

6.7. Influence de la taille des anguilles à pleine ouverture sur leur taux de mortalité

Sur les 29 essais, la taille moyenne des anguilles a varié entre 0.3 m et 1.02 m avec une moyenne de 0.68 m, une médiane de 0.73 m (Q25= 0.6 m et Q75= 0.735 m).

Le Tableau 5 montre que sur les expérimentations portant sur des roues de diamètres comparables (compris entre 3 et 4.5 m) les mortalités sont significativement différentes d'une classe de taille à l'autre, la mortalité ayant tendance à augmenter avec la taille de l'anguille (Figure 9).

Tableau 5 : Tableau des moyennes pour le pourcentage de mortalité par classe de taille moyenne d'anguille.

Taille (m)	[0.2-0.5[	[0.5-0.6[	[0.6-0.7[	[0.7-0.8[	≥0.8	Total
Effectif	2	3	3	3	2	13
Moyenne du taux de mortalité	11	14.5	19.67	37	56.5	26.81

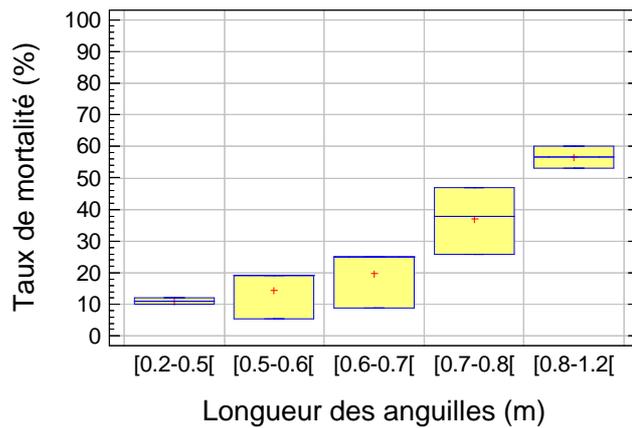


Figure 9 : Boîtes de dispersion des taux de mortalité par classe de taille moyenne

La Figure 10 présente les taux de mortalité observés pour différentes tailles d'anguille lors des expérimentations effectuées à la centrale de Dettelbach (Holzner, 2000). Les résultats mettent très clairement en évidence l'influence de la taille des anguilles sur le taux de mortalité.

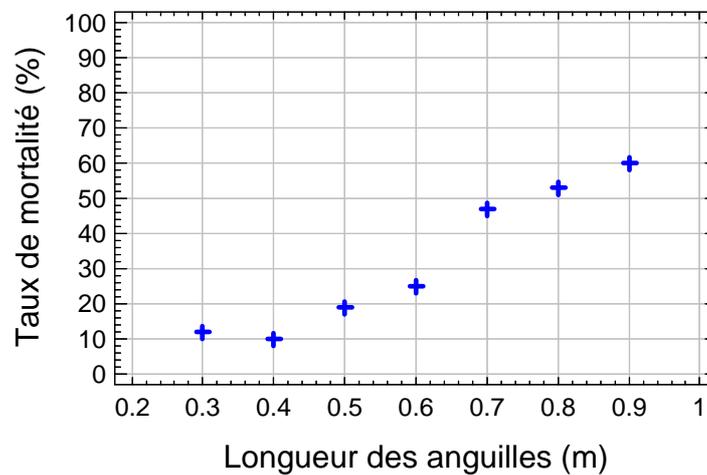


Figure 10 : Taux de mortalité en fonction des différentes tailles d'anguilles sur l'aménagement de Dettelbach (d'après Holzner, 2000)

En conclusion, on peut dire que la tendance générale qui se dégage de l'examen des résultats de l'ensemble de ces études est que l'importance des dommages augmente avec la taille de l'anguille. Les taux de mortalité sont également plus élevés sur les petites turbines à vitesse de rotation élevée que sur les turbines à grands diamètres. Les dommages sont d'autre part moins importants à pleine ouverture qu'à ouverture réduite.

7. PREDICTION DES MORTALITES DES ANGUILLES DANS LES TURBINES KAPLAN

7.1. Intérêt et limites de l'exercice

7.1.1. Intérêt

On rappelle que le règlement européen exige l'évaluation au niveau de chaque bassin des mortalités d'ordre anthropiques. Dans cette optique, l'un des chantiers consistera dans un premier temps à évaluer l'impact cumulé des centrales hydroélectriques à la dévalaison sur les différents axes de migration. Cela passe par l'évaluation des dommages subis par l'anguille argentée lors de sa migration de dévalaison aménagement par aménagement, ce qui suppose que l'on soit capable d'évaluer :

- la part du flux migrant transitant le plus souvent sans dommages par les ouvrages évacuateurs et celle transitant par les turbines, qui est déterminée par les caractéristiques de l'aménagement (caractéristiques de la prise d'eau, débit d'équipement), par les conditions hydrologiques en période de dévalaison et par le comportement migratoire de l'anguille.

- les dommages subis par la part du flux migrant transitant par les turbines, qui sont fonction des caractéristiques des turbines, de leur condition de fonctionnement et de la taille des individus migrants.

Sachant qu'il n'est pas envisageable de procéder à des expérimentations sur chaque aménagement, la prédiction des dommages sur la base de l'expérience acquise est une nécessité.

7.1.2. Difficultés et limites liées aux conditions hydrauliques et aux méthodes expérimentales

Les expérimentations ont démontré que les principales causes de mortalité directe ou immédiate sur l'anguille lors de son passage à travers les turbines Kaplan relevaient de facteurs mécaniques. Tous les auteurs s'accordent sur le fait que les dommages liés aux variations de pression ou au cisaillement sont mineurs pour cette espèce. L'importance des dommages est donc liée à la probabilité et à la violence des chocs, probabilité *a priori* d'autant plus faible que le diamètre de la roue est important, que le nombre de pale est limité, que la vitesse de rotation est faible, et que l'ouverture des pales est importante.

Elle dépend aussi de la zone de passage du poisson dans la roue : les taux de mortalité par choc sont plus faibles sur les poissons passant à proximité du moyeu qu'à la périphérie de la roue (Cada, 2001). Dans les turbines Kaplan, les vitesses relatives de l'écoulement par rapport aux pales augmentent du moyeu à la périphérie. La violence du choc, si choc il y a, est d'autant plus importante que la vitesse relative de l'eau par rapport aux pales est forte. Les chocs seront donc plus violents à la périphérie de la roue qu'au voisinage du moyeu. D'autre part, comme on l'a noté plus haut, les poissons passant à la périphérie ou au niveau du moyeu sont susceptibles de se faire déchiqueter (« grinding ») ou sectionner lorsqu'ils sont pris dans l'espace entre la pale et le manteau ou entre la pale et le moyeu si cet espace est important. Pour une même turbine, les mortalités pourront donc être significativement différentes suivant la zone de passage du poisson, ce qui a priori est difficile de prévoir. Pour deux turbines de caractéristiques générales identiques, les taux de mortalité pourront varier en fonction de l'espace manteau-pales (donnée difficilement accessible) qui peut être plus ou moins important d'une turbine à l'autre.

Ceci peut expliquer en partie la variabilité des mortalités observées lors des expérimentations portant sur une même turbine ou sur des turbines de caractéristiques très voisines.

A cela il convient de rajouter les biais induits par les méthodes expérimentales adoptées pour évaluer les taux de mortalité.

Plusieurs méthodes expérimentales ont été développées pour évaluer les dommages induits par les anguilles lors de leur transit à travers les turbines.

La méthode la plus radicale consiste à injecter le poisson à l'aide d'un tuyau le plus près possible de l'entrée de la roue et à le récupérer immédiatement à l'aval, en filtrant à l'aide d'un filet conique tout le débit de la turbine. Il est théoriquement possible de récupérer ainsi la totalité des poissons injectés. En fait, le taux de récupération est rarement total, les pertes étant imputables à l'échappement des

poissons, soit suite à des déchirures des filets, soit à des interstices entre le cadre et le filet ou le cadre et la structure. Le fait que la recapture des poissons lâchés ne soit pas totale peut induire une surestimation ou une sous-estimation des dommages suivant que l'on calcule le taux de mortalité en se référant au nombre de poissons récupérés ou au nombre de poissons lâchés. C'est la raison pour laquelle il est important d'effectuer lors de chaque expérimentation des essais avec des lots de poissons morts : lorsque les taux de récupération sur les poissons morts sont totaux, on peut faire l'hypothèse que les individus non récupérés sont vivants.

Une autre méthode consiste à injecter dans la turbine un certain nombre de poissons équipés de ballonnets gonflables. Les ballonnets dégonflés, fixés sur le corps du poisson, se gonflent après le passage dans la turbine et ramènent à la surface le poisson qui est récupéré à l'aide d'une embarcation. Cette méthode assez sophistiquée permet d'obtenir généralement des taux de recapture importants et est utilisée pratiquement systématiquement sur les gros ouvrages aux USA et a été brevetée par un bureau d'étude américain (Normandeau Associates Inc.).

L'injection des poissons induit un biais étant donné que l'on détermine dans une certaine mesure la zone où passera le poisson dans la roue, sans le plus souvent savoir dans quelle zone (moyeu, mi-pale, périphérie) il passera : on a noté plus haut que dans les turbines Kaplan, les conditions de vitesses et par conséquent les dommages pouvaient être très différents suivant que le poisson passait à proximité du moyeu ou à la périphérie. Une méthode pour réduire ce biais est d'injecter des lots à plusieurs profondeurs.

Les dommages peuvent être évalués par radiotélémetrie. Un émetteur radio est fixé sur l'anguille qui peut être localisée et suivie après son passage dans la turbine. Les poissons demeurant au pied des turbines sont généralement considérés comme morts. Cependant un poisson continuant son trajet à l'aval n'est pas forcément indemne : l'anguille étant une espèce très résistante, l'expérience montre que les mortalités vont bien au-delà des mortalités immédiates, les poissons non viables étant capables de survivre un temps important avec par exemple la colonne vertébrale brisée. Lorsqu'il existe plusieurs aménagements en série sur un cours d'eau, il peut devenir difficile d'attribuer une mortalité à un aménagement ou à un autre. Cette méthode n'est pas adaptée pour une estimation précise des dommages sur l'anguille.

Une dernière méthode consiste à filtrer à l'aide d'un filet conique tout le débit de la turbine ou à installer un engin de pêche dans le canal de fuite en ne filtrant qu'une partie du débit turbiné lors de la période de migration et à constater l'état des individus ayant transité naturellement par la turbine et récupérés dans le filet. Il n'existe plus de biais lié au point d'injection du poisson dans la turbine. Cependant dans les deux cas, le taux de récupération n'est pas total, en particulier lorsque l'engin de pêche procède par échantillonnage, ce qui peut induire un biais difficile à évaluer.

La grande résistance physique des anguilles, les faisant paraître indemnes suite au passage dans les turbines, alors qu'elles sont affectées de blessures internes létales à terme, a été signalée à plusieurs reprises. Le maintien en stabulation d'anguille pendant plusieurs jours voire plusieurs semaines après leur récupération réduit les biais résultant de la mortalité après délais mais ne supprime pas les effets sub-létaux sur le comportement, la migration et la reproduction (Holzner, 2000).

7.2. Les différentes approches

La tendance générale qui ressort de la revue des données existantes est que les dommages seraient pour la plupart liés à des chocs mécaniques. L'importance de ces dommages augmente avec la taille des individus, les taux de blessures et de mortalités sont significativement plus importants sur les turbines de petites dimensions à vitesse de rotation plus élevées.

Compte tenu de tous les biais déjà évoqués, de la dispersion des résultats expérimentaux et de leur nombre limité, il est illusoire de prétendre que l'on peut proposer très précisément un taux de mortalité pour une turbine de caractéristiques données. Au mieux il est possible de proposer une fourchette en essayant de ne pas surestimer les dommages comme semblent le faire certaines expressions.

La première approche pour estimer la mortalité est une approche purement statistique, qui consiste à relier le taux de mortalité aux différents paramètres caractérisant les turbines ($Dr, Q, H, N, Nap, U, V1n$) et à la taille de l'anguille TL. On se rappellera que les variables sont pour certaines très liées, en particulier Q et Dr. La colinéarité entre variables ne dérange aucunement lorsque le modèle est utilisé à des fins de prédiction (Sherrer, 1984). On effectuera des régressions non linéaires et des régressions log linéaires ridge qui permet d'obtenir des valeurs plus stables des coefficients de la régression linéaire classique lorsque les variables explicatives sont très corrélées.

On peut aussi effectuer des associations *a priori* de paramètres. Par exemple Larinier et Dartiguelongue (1989) avaient montré que le paramètre expliquant le mieux la mortalité était le rapport TL/esp, esp étant l'espacement entre pales à mi-pales, soit $\pi(D_r + D_m)/2 \text{ Nap}$. Le taux de mortalité était donné sous la forme :

$$\text{AMO} = 28.6 + 48.7 (\text{TL}/\text{esp})$$

Avec $\text{AMO} = \text{Arc sin} (M/100)^{0.5}$ soit : $M = 100 (\sin \text{AMO})^2$

Où M est le pourcentage de mortalité.

La seconde approche est une approche déterministe. Dans cette approche, on essaye de modéliser certains des phénomènes que l'on pense être à l'origine des événements étudiés, en l'occurrence ici on recherchera à relier la probabilité de choc mécanique à certaines caractéristiques géométriques ou hydrauliques des turbines.

La probabilité de choc sur un poisson à l'entrée d'une roue a été exprimée par Von Raben (1964) par le rapport du temps nécessaire à un individu pour couper entièrement la trajectoire du bord d'attaque de la pale en entrée au temps mis par cette pale pour parcourir l'espace inter-pales. Les expressions utilisées jusqu'à très récemment par différents auteurs (Bell, 1991 ; Turnpenny, 2000 ; Pavlov *et al.*, 2002 ; Ploskey et Carlson, 2004 ; Hecker et Cook, 2005) sont dérivées et pratiquement identiques, aux notations près, à l'expression proposée par Von Raben dès 1957.

Pour une turbine Kaplan, le temps nécessaire pour couper entièrement parcourir la trajectoire du bord d'attaque de la pale en entrée est (Figure 11):

$$\Delta t_1 = \text{TL} / V_1$$

Où V_1 est la vitesse absolue de l'eau (et poisson) en entrée de roue. Si α est l'angle que fait le vecteur vitesse V_1 avec la vitesse périphérique U on a :

$$V_1 = V_{1n} / \sin \alpha$$

V_{1n} est la composante axiale de la vitesse, égale au rapport du débit sur la section de passage:

$$V_{1n} = 4 Q / \pi (D_r^2 - D_m^2)$$

D'où

$$\Delta t_1 = \text{TL} \sin \alpha / V_{1n}$$

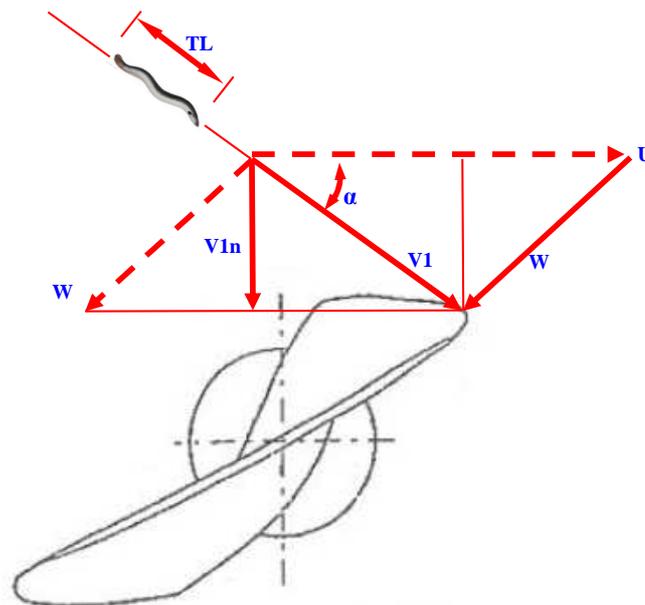


Figure 11: Vue schématique d'une pale de turbine Kaplan avec le triangle des vitesses

Le temps mis par la pale pour parcourir l'espace inter-pale est :

$$\Delta t_2 = 60 \pi Dr / (N \text{ Nap } \pi Dr) = 60 / (N \cdot \text{Nap})$$

La probabilité, rapport des deux temps définis précédemment, peut alors s'exprimer par :

$$P = N \text{ Nap } TL \sin \alpha / 60 V1n$$

A l'exception de l'angle α , tous les paramètres de l'expression précédente sont aisément accessibles.

Cette équation prédit une probabilité d'impact mais les résultats des expérimentations menées sur la centrale d'Obernau (Von Raben, 1957b) montrent qu'elle surestime largement les dommages constatés : la probabilité d'impact calculée sur ce site est de 45.8% alors que la mortalité moyenne constatée sur des anguilles de longueur moyenne 55 cm n'est que de 19.6%. Von Raben définit alors ce qu'il nomme le « facteur de mutilation » K_v , rapport de ces deux pourcentages.

$$K_v = 19.6/45.8 = 0.43$$

L'explication qui est donnée de l'écart entre la théorie et l'observation est que tous les impacts ne résultent pas en dommage, suivant la partie du corps touchée : un choc près de la queue du poisson est moins susceptible d'entraîner des blessures qu'un choc près de la tête ou à mi-corps. Une autre explication est que l'anguille ne se présente pas obligatoirement parfaitement alignée avec la ligne de courant, son temps de passage au niveau du bord d'attaque des pales se trouvant alors significativement réduit.

Le taux de dommage observé est donc égal au produit la probabilité de choc (P) par le facteur de mutilation (K_v) On a alors :

$$M (\%) = 100 K_v \cdot P = 43 \text{ Nap } TL N \sin \alpha / 60 V1n$$

Von Raben note cependant que ce facteur de mutilation n'a été calculé que sur une seule turbine et pour une seule condition d'ouverture et incite à la prudence quant à son extrapolation à d'autres turbines.

Plus récemment, d'autres auteurs ont affiné cette notion de facteur de mutilation. Turnpenny et al. (2000) relie ce facteur à la taille du poisson : pour une même probabilité d'impact, le taux de mortalité est plus important pour un poisson de grande taille que sur un poisson de petite taille.

$$M (\%) = 100 K_t \cdot P = 100 (0.718 + 0.357 \log TL) \text{ Nap } TL N \sin \alpha / 60 V1n$$

Le facteur de mutilation K_t proposé par Turnpenny est plus élevé que celui de Von Raben si on l'applique à l'anguille (Figure 12): le rapport de ces deux facteurs K_t/K_v passe de 1.42 à 1.63 pour des tailles d'anguilles variant de 0.50 m à 0.90 m. Les essais de Turnpenny portent cependant sur d'autres espèces que l'anguille et des individus de plus petites tailles, deux raisons pour lesquelles il convient de rester très prudent quant à son utilisation pour la prédiction des dommages sur l'anguille.

Très récemment, ce facteur de mutilation a été également relié, en plus de la taille du poisson, à la vitesse relative du poisson par rapport aux pales ($W1$) en entrée de roue, vitesse indicatrice de la violence du choc (Hecker et Cook, 2005) :

$$M (\%) = 100 K_a \cdot P = 100 (0.158 TL^{1.1} + 0.0313 W1^{1.15}) \text{ Nap } TL N \sin \alpha / 60 V1n$$

où TL est la longueur du poisson exprimée en m et $W1$ la vitesse relative en entrée de roue exprimée en m/s.

Ce facteur de mutilation K_a («Alden Strike factor») proposé par Hecker et Cook est plus élevé que celui de Von Raben si on l'applique à l'anguille : le rapport K_a/K_v augmente avec la taille et la vitesse. Il se situe, pour des tailles d'anguilles variant de 0.50 m à 0.90 m, dans la plage de 1.2 à 1.35 pour une vitesse $W1$ de 10 m/s et de 3.12 à 3.27 pour une vitesse de 25 m/s.

On notera cependant que ce dernier facteur de mutilation a été obtenu sur des poissons de tailles réduites (de 3 à 17 cm), à partir d'espèces autres que l'anguille, et que les essais ne portaient d'autre part que sur une seule turbine.

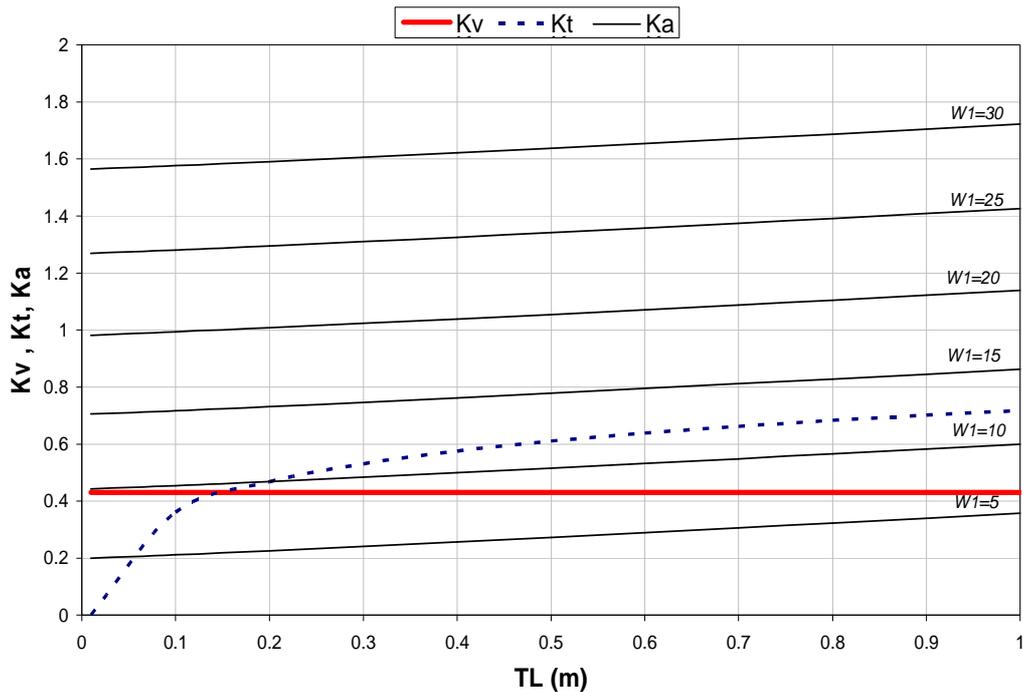


Figure 12 : Comparaison des facteurs de mutilation Kv, Kt et Ka en fonction de la taille des anguilles (TL en m)

Les expressions précédentes ont l'inconvénient de faire intervenir les caractéristiques des vitesses en entrée (angle α , vitesse $W1$), données qui ne peuvent s'acquérir que par l'évaluation des triangles de vitesses à partir des caractéristiques de la turbine.

On a approximativement, aux conditions nominales :

$$\sin\alpha = 1.0500 - 0.0364 \text{ Nap}$$

La vitesse $W1$ est variable et diminue de la périphérie au moyeu. Elle peut s'exprimer en fonction de la vitesse périphérique et du nombre de pales :

$$W1e = U1 (0.00012 \text{ Nap}^2 - 0.03175 \text{ Nap} + 1.07043) \quad (\text{périphérie})$$

$$W1m = U1 (0.00206 \text{ Nap}^2 - 0.04040 \text{ Nap} + 0.82627) \quad (\text{mi-pale})$$

$$W1i = U1 (0.00255 \text{ Nap}^2 - 0.02131 \text{ Nap} + 0.43) \quad (\text{moyeu})$$

Avec la vitesse périphérique $U1 = \pi \text{ Dr N} / 60$

Les relations précédentes sont issues de données statistiques provenant de différents constructeurs.

L'application du facteur de mutilation d'Alden suppose que l'on connaisse la zone de passage du poisson, la valeur de ce facteur variant entre la périphérie et le moyeu : le ratio de ce facteur Ka entre l'extérieur et le moyeu est fonction du nombre de pales, il est par exemple de 3.25 pour 4 pales et de 2.55 pour 8 pales.

La contrainte que l'on s'est donnée dans la présente étude est de se limiter aux paramètres facilement accessibles en pratique pour l'évaluation des formules prédictives des mortalités comme le diamètre de la turbine (Dr), la vitesse de rotation (N), le nombre de pales (Nap), le débit (Q), la hauteur de chute (H), la vitesse périphérique (U), ainsi qu'évidemment la taille des individus (TL). C'est la raison pour laquelle on a privilégié la modélisation statistique. On confrontera à notre échantillon expérimental les résultats donnés par la modélisation de la probabilité de choc, en adoptant successivement les facteurs de mutilation Kv , Kt , Ka proposés par Von Raben, Turnpenney et Hecker et Cook.

7.3. Modèles régressifs sur les variables (TL, N, Dr et Q)

Les formules de prédiction ont été établies à partir des essais effectués à ouverture supérieure à 70%, c'est-à-dire pour les conditions de fonctionnement les moins dommageables pour les poissons. L'analyse des données a mis en évidence que l'introduction des essais à ouverture partielle et caractérisés par des mortalités plus élevées induisait une variabilité plus importante de la mortalité sans pour cela qu'apparaisse comme facteur explicatif le facteur ouverture.

Les régressions ont été effectuées directement sur les pourcentages de mortalité (M) en évitant la transformation de la variable en Arcsin classiquement utilisée lorsqu'on travaille sur des pourcentages (Tomassone *et al.*, 1983). En effet, cette transformation n'est pas aussi performante sur les valeurs extrêmes qu'elle ne l'est sur les autres valeurs (Larinier et Travade, 1999). D'autre part dans le domaine des fortes mortalités, pour les tailles importantes et les faibles diamètres de turbine, dès que la valeur de l'angle calculée dépasse 90°, valeur pour laquelle on a 100% de mortalité, la valeur de la mortalité calculée décroît. Par exemple, pour un arc de 130°, le calcul donne une mortalité de 59% alors qu'elle est en fait de 100%.

La régression logistique exige de connaître le nombre d'individus pour chaque test, ce qui n'est pas le cas.

Quel que soit le type de régression utilisé (linéaire, ridge, non linéaire, log linéaire...) ni la hauteur de chute H, ni le nombre de pales Nap n'expliquent de manière significative la mortalité.

Les 4 variables explicatives suivantes ont été utilisées dans les régressions :

- le diamètre de la roue Dr (m)
- la vitesse de rotation N (trs/min)
- le débit de la turbine Q (m³/s)
- la taille de l'anguille TL (m)

Plusieurs formules prédictives sont proposées à partir de ces variables explicatives.

7.3.1. A partir des variables Dr, TL, N

On a effectué une régression non-linéaire sur les variables Dr, TL et N. Cette procédure réalise une optimisation par itération (méthode de Marquardt) pour l'estimation des paramètres. On a donné un poids supplémentaire aux essais à mortalités réduites de Linne, St Lawrence et Beauharnois, équipées de turbines sous-représentées dans l'échantillon.

La régression non linéaire (RNL19) suivante explique 84% de la variabilité du pourcentage de mortalité:

$$M (\%) = 4.67 TL^{1.53} Dr^{-0.48} N^{0.6}$$

Les résidus studentisés mesurent de combien d'écarts-types chaque valeur observée du pourcentage de mortalité s'écarte d'un modèle ajusté avec toutes les données sauf cette valeur. Dans ce cas, il y a 3 résidus studentisés supérieurs à 2.0, mais aucun supérieur à 3.0. Il s'agit d'un essai réalisé à Linne et des résultats concernant les anguilles de grandes tailles à Dettelbach.

On a porté sur la Figure 13, les valeurs observées et celles prédites par l'expression précédente en fonction des différents essais classés par nombre de pales et de diamètres croissants. Sur ce graphique ont été également portés les essais sur Kleinwallstadt (WALL1), Obernau (OBER1), Frankel (FRANK1) et Raymondville (RAYM1), même si ceux-ci n'ont pas été retenus pour la modélisation. En effet, comme on l'a noté plus haut, il n'a pas été possible de retrouver dans la bibliographie à quel pourcentage d'ouverture ont été effectués les essais de Raymondville et d'Obernau ; de plus les faibles taux de recapture ainsi que la méthode de pêche utilisée laissent planer un certain doute sur la signification des pourcentages de mortalité donnés pour Kleinwallstadt.

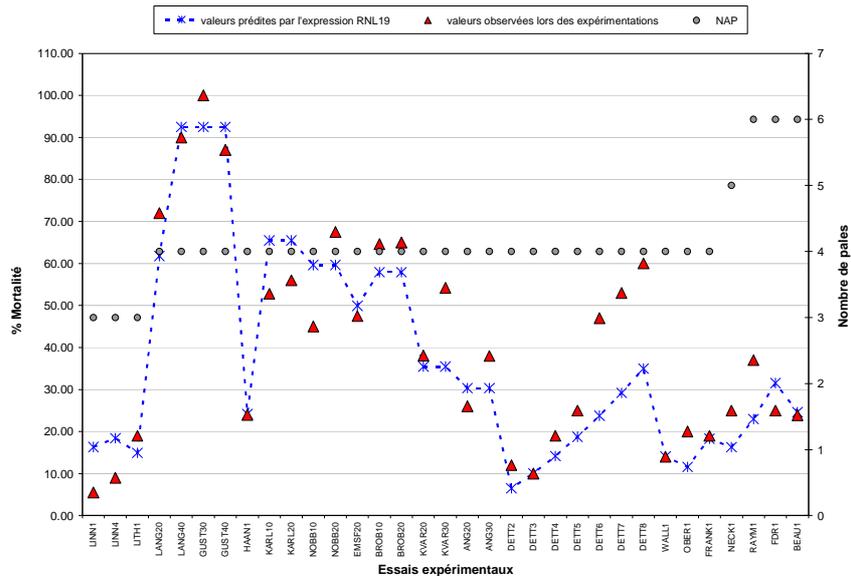


Figure 13 : Taux de mortalité observée et prévue par la formule RNL19 pour les essais expérimentaux.

7.3.2. A partir des variables Q, TL, N

De manière identique à la modélisation précédente, on a effectué une régression non-linéaire sur les variables Dr, TL et N. On a donné un poids supplémentaire aux essais à mortalités réduites de Linne, St Lawrence et Beauharnois.

La régression non linéaire (RNL25) suivante explique 84.8% de la variabilité du pourcentage de mortalité:

$$M (\%) = 6.59 TL^{1.63} Q^{-0.24} N^{0.63}$$

Les deux résidus studentisés possédant une valeur supérieure à 2.0 sont les résidus concernant les deux mêmes essais que la régression précédente, à savoir l'un réalisé à Linne et l'autre réalisé à Dettelbach.

On a porté sur la Figure 14 les valeurs observées et celles prédites par l'expression précédente en fonction des différents essais classés par aménagement de pales et de diamètre de roue croissants.

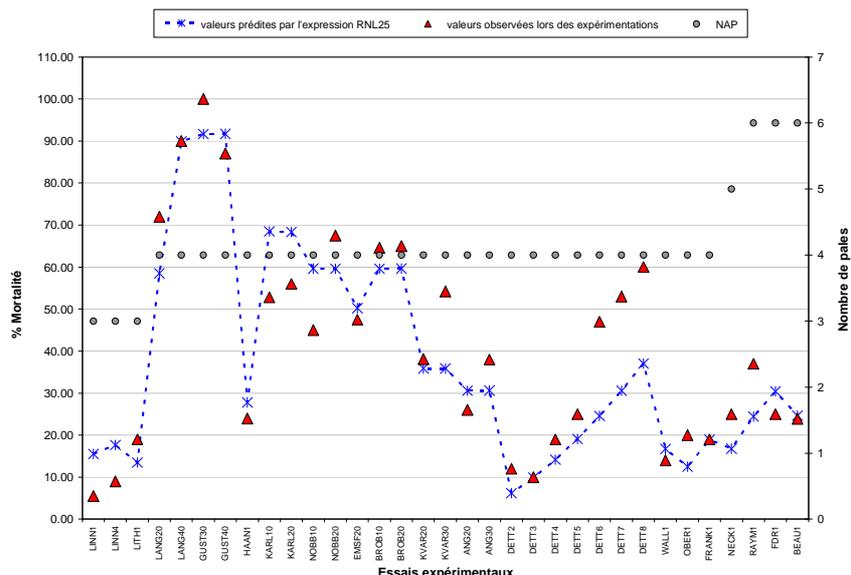


Figure 14 : Taux de mortalité observée et prévue par la formule RNL25 pour les essais expérimentaux.

7.3.3. A partir des variables Dr, Q, TL, N

Pour ce modèle les 4 variables ont été utilisées. Deux des variables prédictives étant fortement corrélées entre elles (Dr et Q), on a utilisé la régression log linéaire ridge. Cette méthode permet de remédier aux problèmes de la colinéarité des variables en modifiant la méthode des moindres carrés pour permettre des estimations biaisées mais plus stables des coefficients de la régression.

La régression (RR19) obtenue pour un paramètre Ridge de 0.06 explique 73% de la variabilité du pourcentage de mortalité:

$$M (\%) = 12.42 TL^{1.36} Q^{-0.22} Dr^{-0.10} N^{0.49}$$

On a porté sur la Figure 15 les valeurs observées et celles prédites par l'expression précédente en fonction des différents essais classés par aménagement et par diamètre de roue et nombre de pales croissants.

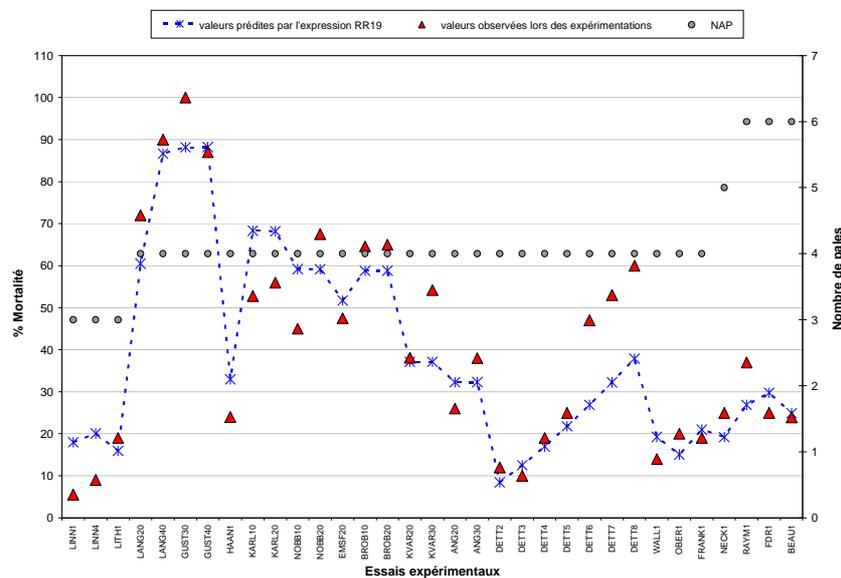


Figure 15 : Taux de mortalité observée et prévue par formule RR19 pour les essais expérimentaux.

7.3.4. Discussion

Les trois expressions donnent une bonne estimation des mortalités à Dettelbach sur les anguilles de tailles limitées ; par contre elles sous-estiment assez largement (de l'ordre de 15-20%) les mortalités sur les anguilles de tailles élevées. Cela s'explique par le fait que la mortalité observée augmente très rapidement avec la taille (puissance voisine de 2) sur cet aménagement alors que la taille intervient dans les régressions à une puissance significativement inférieure (de 1.35 à 1.6).

Pour les turbines équipant l'aménagement de Frankel sur la Moselle, (données non utilisées pour le modèle), les expressions donnent des pourcentages de mortalité de l'ordre de 20% pour une taille d'anguille de 70 cm (et respectivement de 12-13% et 26-29% pour des tailles de 50 cm et 90 cm). On rappelle (voir §4) que lors des pics de capture le taux de mortalité enregistré a été de 19%, les turbines fonctionnant alors très probablement à pleine ouverture.

Les expressions donnent des pourcentages de mortalité de l'ordre de 13-19% pour une taille d'anguille de 60 cm pour l'aménagement de Kleinwallstadt (données non utilisées pour le modèle). Le taux de mortalité donné par les auteurs est de 14%, les turbines fonctionnant à pleine ouverture.

Concernant la turbine sur l'aménagement d'Obernau (données non utilisées pour le modèle), on obtient un taux de mortalité variant de 12% à 15% selon la formule utilisée pour une taille moyenne

d'anguille estimée à 0.55 m. Ces valeurs sont plus faibles que les taux de mortalités obtenus expérimentalement qui étaient de 20% (Von Raben, 1964).

Pour l'aménagement de Baigts sur le Gave de Pau, les expressions donnent des pourcentages de mortalité de l'ordre de 47% pour une taille d'anguille de 70 cm (et respectivement de 25% et 67% pour des tailles de 50 cm et 90 cm). Les études de télémétrie menées pendant 3 ans (de 2004 à 2006) sur ce site indiquent des mortalités globale (immédiate et différée) de l'ordre de 25% (Subra et al., à paraître), chiffre cependant à prendre avec précaution compte tenu de l'incertitude importante des estimations effectuées à partir des expérimentations par télémétrie.

Ces trois formules (RNL19, RNL25 et RR19) ont été appliquées pour 3 tailles d'anguilles (TL=0.5 m, TL=0.7 m, TL=0.9 m) à un échantillon de 67 turbines de chutes et diamètres de roue variables (classées par ordre de diamètres décroissants), la plupart situées en France, couvrant approximativement l'ensemble des caractéristiques des turbines Kaplan (figure 16 à 18) susceptibles d'être concernées par la migration de l'anguille. Ces trois expressions donnent pour une même turbine des valeurs proches les unes des autres ; de plus elles restent cohérentes quelles que soient la taille de l'anguille et les caractéristiques des turbines.

Dans les quelques cas où ces expressions donnaient des valeurs très différentes, on a vérifié que cela provenait soit de données erronées et incohérentes sur les caractéristiques des turbines (débit, diamètre ou vitesse de rotation), soit de turbines effectivement atypiques. C'est pourquoi on se gardera d'utiliser ce type de formule pour les turbines dites « ichtyophiles », dans la mesure où les caractéristiques de ces turbines (relations entre débit, diamètre et vitesse de rotation) sont très différentes des turbines Kaplan classiques : en particulier, pour un débit et une chute données, le diamètre de la turbine sera beaucoup plus important et la vitesse de rotation beaucoup plus faible.

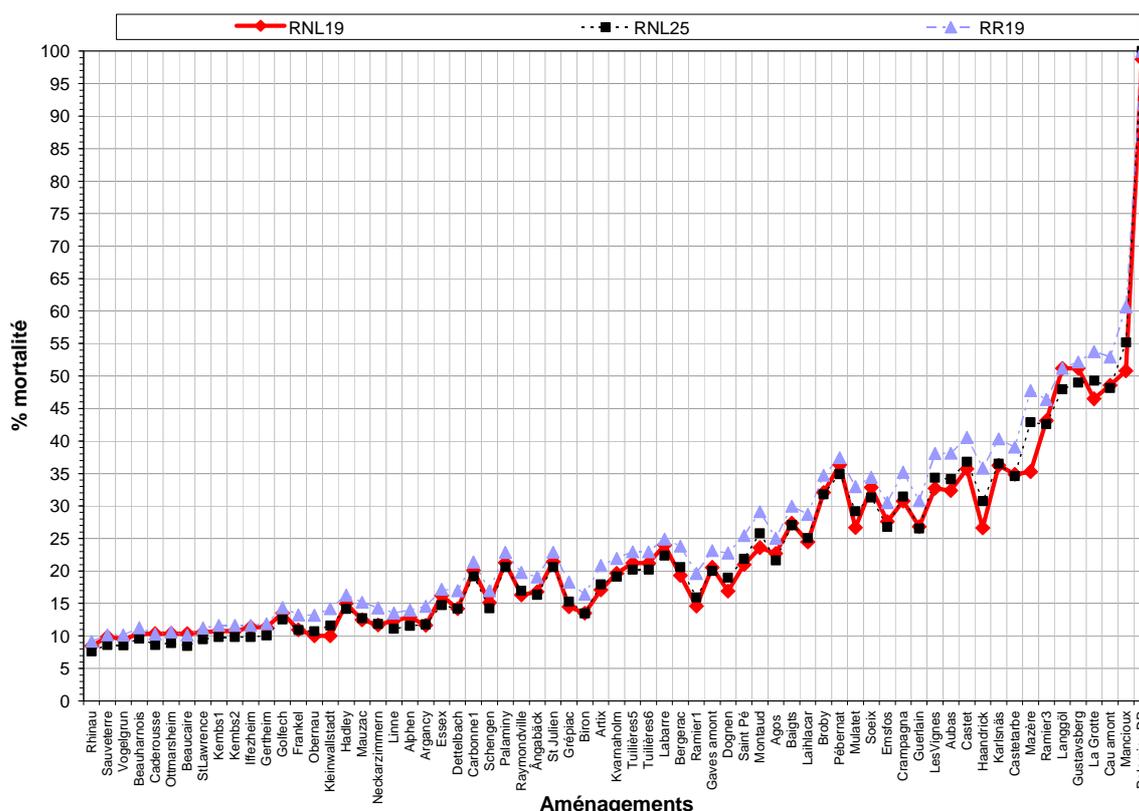


Figure 16: Taux de mortalité prévue par les formules RNL19, RNL25, RR19 sur 67 turbines pour une taille d'anguille de 50 cm.

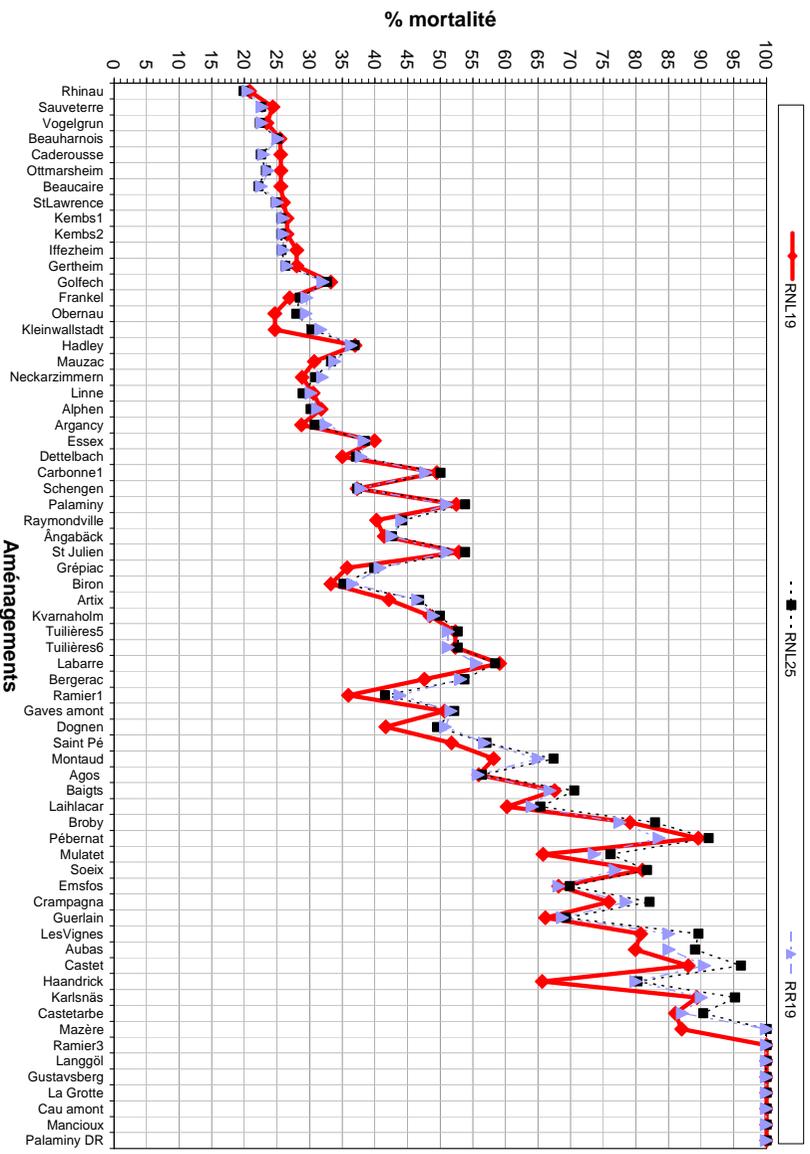
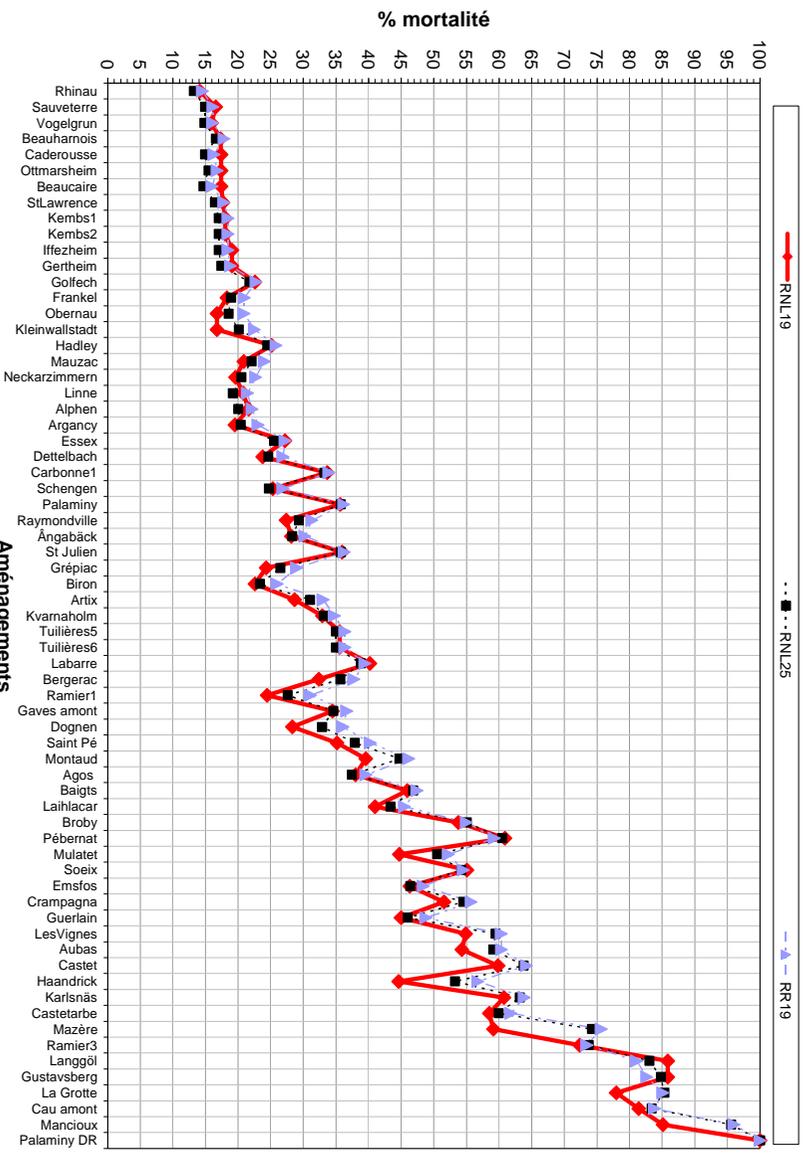


Figure 18 : Taux de mortalité prévue par les formules RNL19, RNL25, RR19 sur 67 turbines pour une taille d'anguille de 90 cm.

7.4. Probabilités de chocs et facteurs de mutilation

On a comparé les pourcentages de mortalités observés et ceux donnés par les probabilités de chocs corrigées par les facteurs de mutilation Kv, Kt, Ka de Von Raben, Turnpenny et Alden (figure 19 à 21).

Le facteur de mutilation proposé par Von Raben semble de loin le meilleur des trois, ce qui n'a rien d'étonnant dans la mesure où le coefficient Kt a été calé à la centrale d'Obernau sur des résultats concernant l'anguille, alors que le calage des facteurs de mutilation de Turnpenny et d'Alden ont été effectués sur d'autres espèces que l'anguille et des individus de plus petites tailles.

L'équation de Von Raben sous-estime les mortalités sur certaines turbines suédoises et les surestime sur les turbines d'Haandruck et de Kleinwallstadt. Cela peut s'expliquer par la présence dans la formule de probabilité de choc de la vitesse axiale V_n , la probabilité de choc étant inversement proportionnelle à la vitesse axiale.

L'utilisation des facteurs de mutilation de Turnpenny et d'Alden, multipliant les taux de mortalité par un facteur de l'ordre de 1.5 (Turnpenny) et entre 1.2 et 3 (Alden) par rapport à ceux donnés par l'équation de Von Raben, se traduit par une surestimation très nette des mortalités. Par contre, ces facteurs rendent mieux compte de l'augmentation des mortalités avec la taille à la centrale de Dettelbach. Ces deux facteurs surestiment les mortalités sur les centrales de Beauharnois et de Saint Lawrence, ce qui peut s'expliquer par la taille importante des anguilles utilisées sur ces deux sites.

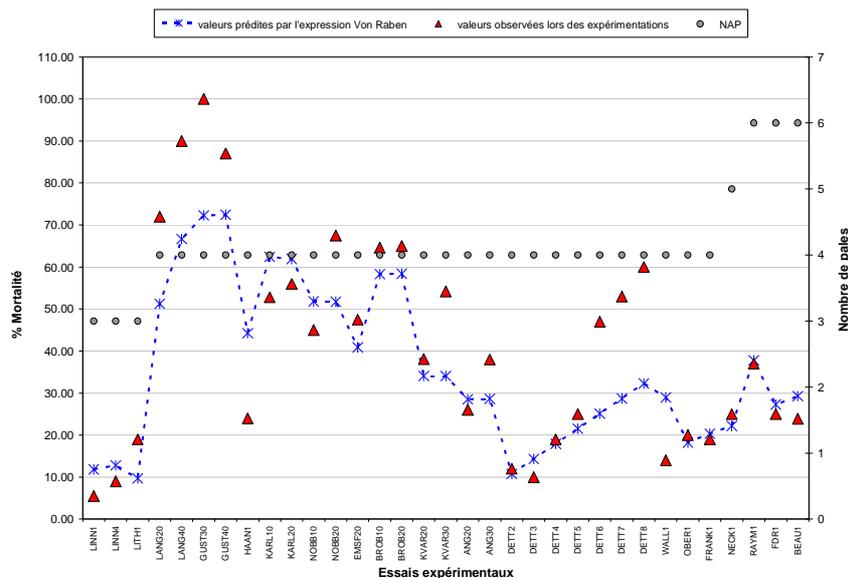


Figure 19 : Taux de mortalité prévus par la formule de Von Raben pour les essais expérimentaux.

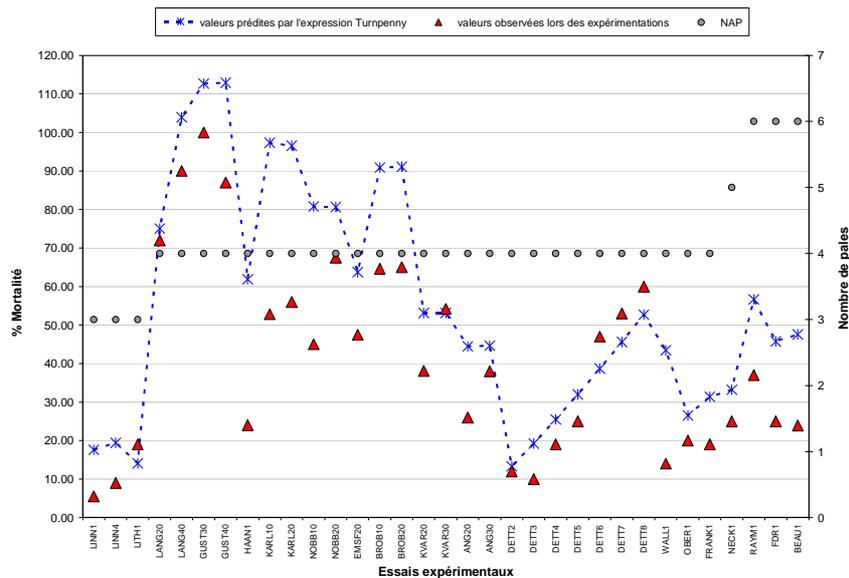


Figure 20 : Taux de mortalité prévus par la formule de Turpenny pour les essais expérimentaux.

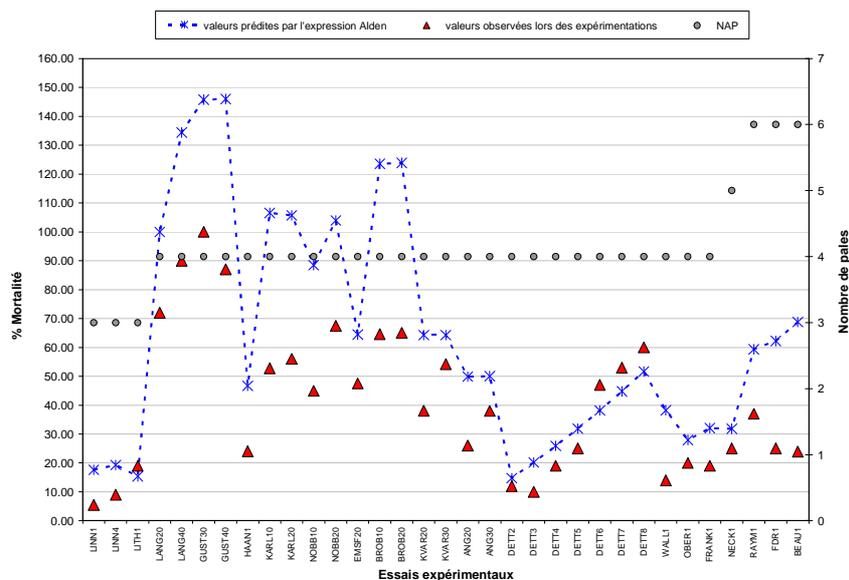


Figure 21 : Taux de mortalité prévus par la formule d'Alden pour les essais expérimentaux.

Les trois expressions précédentes ont été appliquées pour trois tailles d'anguille (TL=0.5 m, 0.70 m et 0.90 m) au même échantillon de turbines que précédemment. On a porté sur les figures 22, 23 et 24 les taux de mortalités prédits à partir des facteurs de mutilation et probabilité de choc en les comparant à ceux donnés par l'expression RNL19.

L'utilisation des facteurs de mutilation de Turpenny (Kt) et Alden (Ka) donnent des mortalités systématiquement plus fortes, voire beaucoup plus fortes, que celles obtenues avec le facteur de mutilation constant (Kv) de Von Raben.

La formule de Von Raben donne dans l'ensemble des valeurs qui sont relativement proches de celles données par les formules obtenues par régression, les mortalités augmentant moins nettement en fonction de la taille des individus. Elle donne en moyenne des valeurs légèrement supérieures pour les tailles de 0.70 m (rapport 1.05) et 0.50 m (rapport 1.07) et plus nettement inférieures (rapport 0.80) pour des tailles de 0.90 m (figures 22 à 24). Cela s'explique par le fait que le taux de mortalité croît

linéairement avec la taille dans la probabilité de choc alors que dans les régressions la taille intervient à une puissance variant de 1.36 à 1.63.

Si l'on compare maintenant les estimations site par site, on s'aperçoit que les mortalités données par la probabilité de choc sont significativement plus importantes ou au contraire moins importantes sur certains sites. Elles sont moins importantes sur les sites de Linné, Alphen, Schengen, Agos, Essex, équipés de turbines à 3 pales et/ou ayant de fortes vitesses axiales V1n ; elles sont par contre plus importantes sur les sites possédant 5 ou 6 pales comme Beauharnois, Carbonne, Palaminy, Pébernat ou caractérisées par une faible vitesse axiale.

On peut se poser la question de la pertinence de faire apparaître le paramètre V1n au dénominateur alors que les paramètres V1n, U et W1 sont corrélés : une augmentation de V1n se traduit d'une part par une réduction de la probabilité de choc et d'autre part par une augmentation de la violence des chocs. Si on effectue la régression linéaire prenant en compte comme variable indépendante la probabilité de choc, la seule autre variable intervenant de façon significative dans l'explication de la mortalité est V1n, dont l'effet est d'augmenter - et non de réduire - la mortalité induite par cette probabilité de choc :

$$M (\%) = 36.4 P + 1.14 V1n \quad (R^2 = 0.73)$$

La probabilité de choc et le facteur de mutilation ne prennent pas en compte d'autres facteurs de mortalité comme les dommages consécutifs à l'existence éventuelle d'un espace important entre les pales et le manteau, ou entre les pales et le moyeu de la roue, cet espace pouvant être très significativement différent pour deux turbines aux caractéristiques par ailleurs identiques. Pour les turbines induisant des chocs peu violents, l'intégralité des mortalités peut être causée par le passage d'un certain nombre d'individus dans cet interstice.

En conclusion, on préférera pour la prédiction des mortalités l'utilisation des expressions statistiques à celles issues des approches conceptuelles de la probabilité de choc et du facteur de mutilation, la réduction de la mortalité à la probabilité de choc étant une trop grande simplification de la réalité et les facteurs de mutilation proposés par les différents auteurs n'étant pas adaptés à l'anguille.

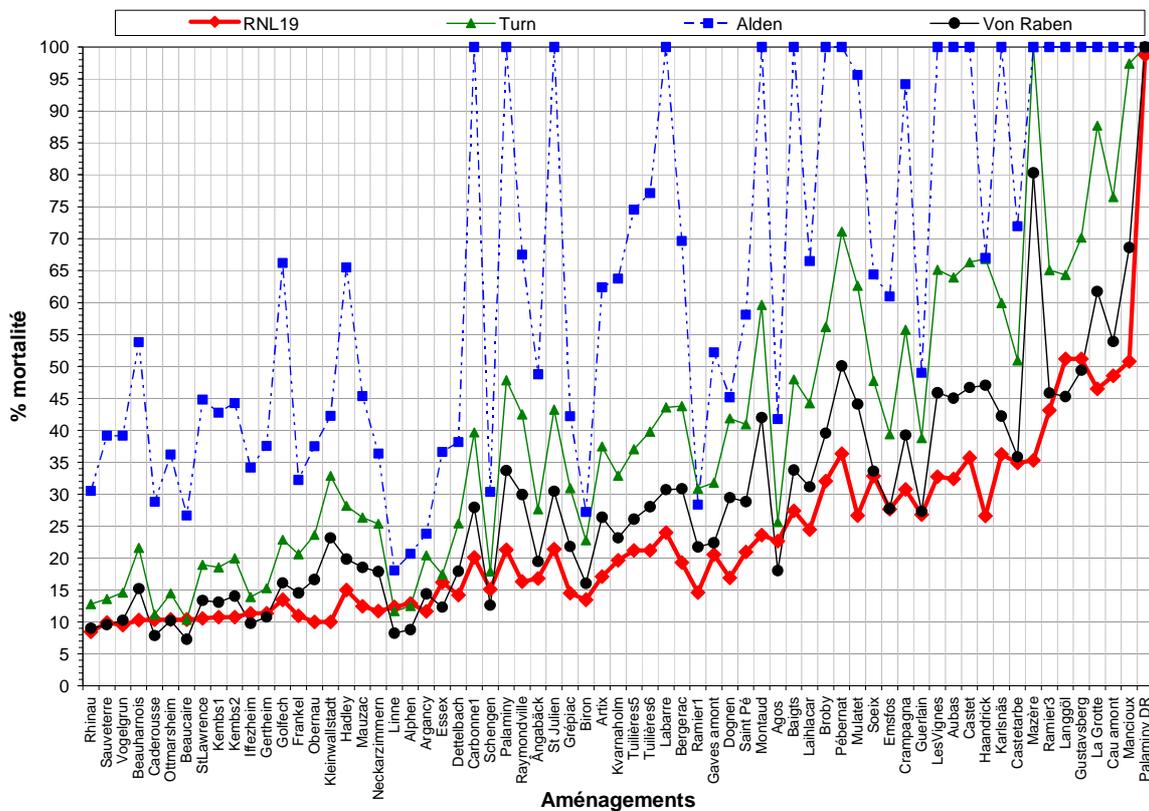


Figure 22 : Comparaison des taux de mortalité donnés par la formule RNL19 et prédits à partir de la probabilité de choc et des facteurs de mutilation Kv, Kt, Ka pour une taille d'anguille de 50 cm.

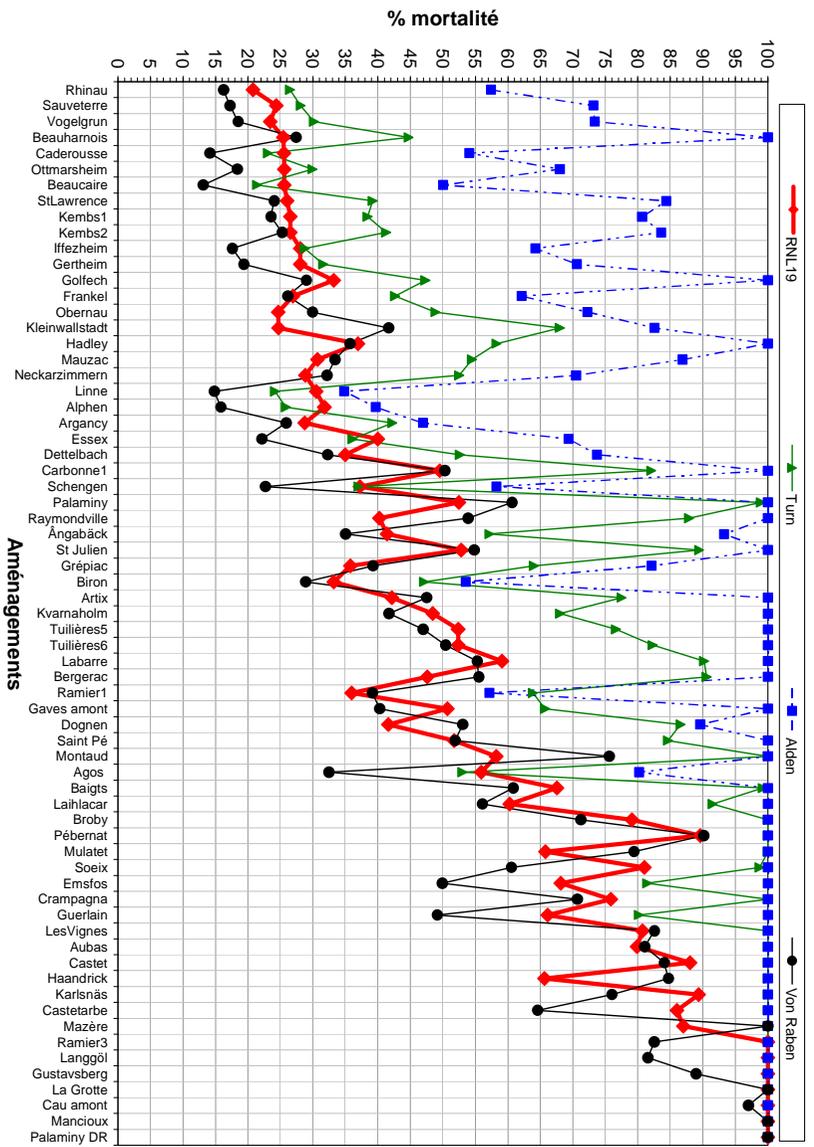


Figure 23 : Comparaison des taux de mortalité donnés par la formule RNL19 et prédits à partir de la probabilité de choc et des facteurs de mutilation Kv, Kt, Ka pour une taille d'anguille de 70 cm.

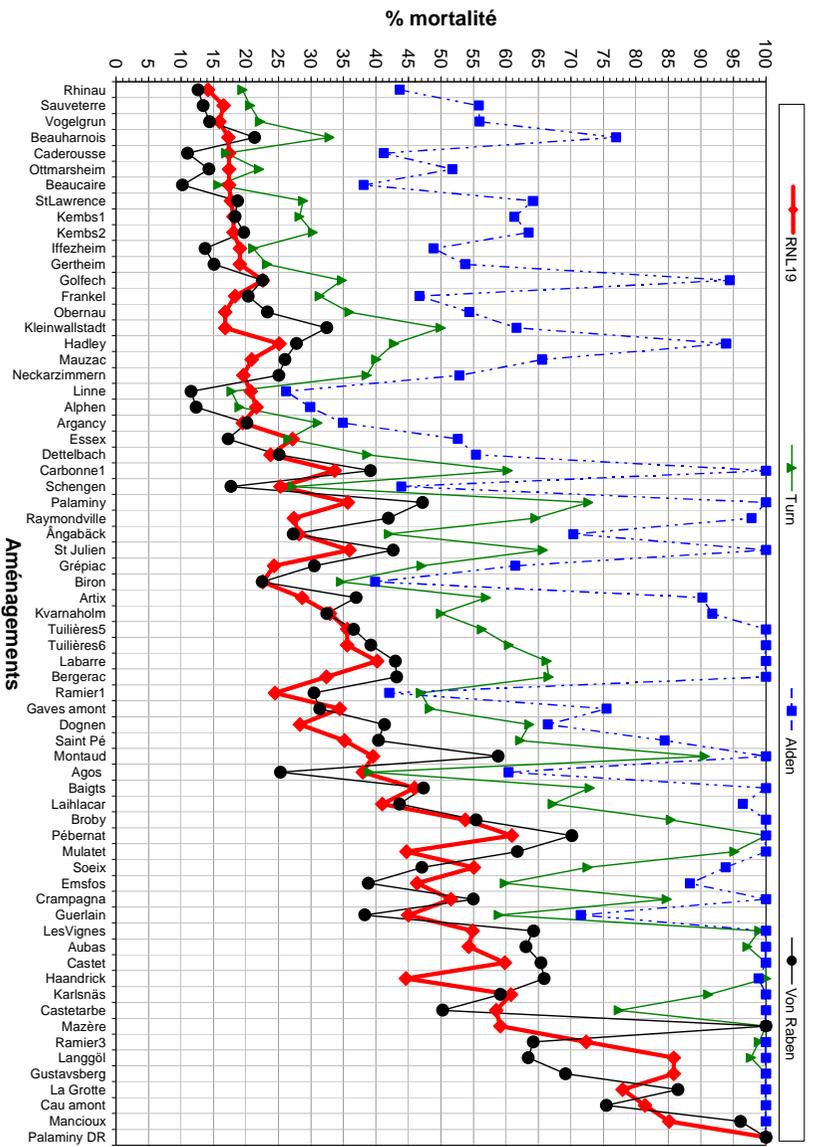


Figure 24 : Comparaison des taux de mortalité donnés par la formule RNL19 et prédits à partir de la probabilité de choc et des facteurs de mutilation Kv, Kt, Ka pour une taille d'anguille de 90 cm.

8. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

La constatation des dommages induits par les turbines, en particulier les turbines Kaplan, n'est pas un phénomène récent et date de la fin du 19^{ème} siècle, certaines observations provenant de pêcheurs professionnels qui récupéraient dans leurs engins des anguilles mortes ou encore vivantes mais plus ou moins gravement endommagées. Les expérimentations montrent que les dommages sur les anguilles sont notables, même sur les turbines Kaplan de grand diamètre. Ils sont généralement supérieurs à 15-20%. Les facteurs d'ordre mécanique (chocs, abrasion et passage dans les interstices entre pales et manteau) apparaissent comme les principaux facteurs de dommage. Les blessures les plus souvent observées sont des sectionnements totaux, des sectionnements partiels ou autres blessures externes ainsi que des déformations importantes, voire des ruptures de la colonne vertébrale sans blessure externe. La grande résistance physique de l'anguille, les faisant paraître indemnes suite au passage par la turbine, a été notée par plusieurs auteurs. Lors des expérimentations, le maintien d'anguille en stabulation, même pendant des périodes assez longues après leur passage dans une turbine, réduit le biais résultant de la mortalité différée, mais ne tient pas compte des effets sub-létaux sur le comportement, la migration et la survie à terme.

L'examen des résultats des différents tests (71 dont 29 à ouverture >70%) portant sur des turbines Kaplan montre que les mortalités sont minimales à pleine ouverture et sont fonction de la taille de l'anguille et du diamètre de la roue, sachant que débit et vitesses de rotation sont étroitement liés à ce diamètre sur les turbines Kaplan classiques.

On a proposé trois expressions obtenues par régression non-linéaire et log-linéaire donnant un pourcentage de mortalité M (en %) à **pleine ouverture** en fonction de la taille de l'anguille TL (en m), du diamètre de la roue Dr (en m), du débit nominal Q (en m³/s) et de la vitesse de rotation de la turbine N (en trs/min) :

$$M (\%) = 4.67 TL^{1.53} Dr^{-0.48} N^{0.6}$$

$$M (\%) = 6.59 TL^{1.63} Q^{-0.24} N^{0.63}$$

$$M (\%) = 12.42 TL^{1.36} Q^{-0.22} Dr^{-0.10} N^{0.49}$$

Le fait que ni le nombre de pales ni la hauteur de chute n'interviennent dans la prédiction de la mortalité s'explique par le nombre limité de tests et surtout l'absence de données pour certaines architectures de turbines Kaplan. On a une sur-représentation des turbines comportant 4 pales et par contre un nombre limité de roues à 3 ou 5-6 pales. On a d'autre part une sous-représentation des turbines de puissances inférieures à 500 kW fonctionnant sous très basses chutes (<3-4 m) et turbinant des débits relativement faibles (<15-20 m³/s) ainsi que des grosses turbines de 10 à 50 MW à débits de l'ordre de 150-400 m³/s fonctionnant sous 10-20 m de chute. Il serait intéressant de réaliser des expérimentations pour compléter et obtenir un échantillon de données plus représentatif. C'est ce qui a été décidé dans le cadre du programme national R&D anguille où les dommages induits par les très grosses turbines Kaplan ou bulbe équipant le Rhin et le Rhône feront l'objet d'évaluation.

Les expressions proposées donnent une estimation des mortalités à **pleine ouverture**. Les mortalités à ouvertures réduites sont significativement plus importantes, les données ne permettant cependant pas la modélisation de la variation de la mortalité en fonction du degré d'ouverture. L'intérêt d'un tel modèle est limité d'un point de vue pratique : il semble en effet préférable pour l'évaluation des dommages induits par un aménagement donné de considérer les turbines fonctionnant à pleine ouverture. Le fait que les dommages augmentent à ouverture réduite est cependant d'importance pour la gestion des aménagements. Ainsi, en période de migration de l'anguille, sur un aménagement comportant plusieurs turbines, il sera préférable, lors des périodes où les débits du cours d'eau sont inférieurs au débit d'équipement, de faire fonctionner le maximum de turbines à pleine ouverture. Une turbine à pleine ouverture sera moins dommageable que plusieurs turbines fonctionnant à ouvertures réduites.

Les relations prédictives des dommages ne sont pas applicables aux turbines atypiques, en particulier aux turbines dites « fish friendly », ichtyocompatibles ou ichtyophiles®. L'architecture de ces turbines est en effet très différente, les relations entre diamètres, vitesses de rotation, nombre de pales n'ont plus rien à voir avec celles régissant les turbines classiques. Le principe ayant guidé à la conception de ces turbines est de réduire les principaux facteurs de mortalité, en particulier les dommages liés à

la pression et au gradient de pression, aux cisaillements et aux facteurs mécaniques (abrasion, broyage, probabilité et violence des chocs). Par rapport à une turbine classique dimensionnée pour la même chute et le même débit, le diamètre sera augmenté, les espacements entre pales et manteau minimisés, les vitesses de rotation et les vitesses périphériques réduites, ainsi que dans certains cas le nombre de pales. Pour ce qui concerne l'anguille, toute modification se traduisant par une réduction des chocs, principaux facteurs de mortalité, pourra se traduire par une réduction significative des dommages. Les expérimentations récentes menées sur la turbine ichtyophile® VLH (Very Low Head) à la centrale de Troussy sur le Tarn ont mis en évidence des mortalités moyennes de 7.8% alors que les mortalités prédites sur une turbine classique installée dans les mêmes conditions de débit et de chute serait de l'ordre de 35-40%. Les mortalités constatées sur la turbine VLH ont été attribuées à l'existence d'un espace important entre la pale et le manteau cylindrique de la roue à pleine ouverture et devraient pouvoir être réduites en modifiant le profil de ce manteau de façon à réduire cet espace (Lagarrigue *et al.*, 2008).

La plupart des turbines équipant les cours d'eau concernés par la migration de l'anguille argentée sont des turbines Kaplan, pour la bonne raison que ce sont généralement des aménagements de basse chute, voire de très basse chute. Il existe cependant un certain nombre d'aménagements, généralement anciens, équipés de turbines Francis à grands diamètres. Les quelques expérimentations effectuées sur le transit de l'anguille à travers ce type de turbine ont montré que les dommages ne sont pas plus importants que ceux induits lors du transit à travers une turbine Kaplan de même débit fonctionnant sous la même chute (Desrochers, 1995 ; EPRI, 2001) et que les dommages, au contraire des turbines Kaplan, ont tendance à diminuer à ouvertures réduites. Le nombre très limité d'expérimentations effectuées sur ce type de turbine pour l'anguille ne permet cependant pas l'établissement de formules prédictives.

L'évaluation des dommages subis par l'anguille argentée lors de sa migration de dévalaison suppose que l'on évalue les dommages subis par la part du flux migrant transitant par les turbines, la présente étude se réfère à ce premier point. Elle suppose d'autre part que l'on soit capable d'évaluer la part du flux migrant transitant, le plus souvent sans dommages, par les ouvrages évacuateurs. Cette part est déterminée par les caractéristiques de l'aménagement (caractéristiques de la prise d'eau, débit d'équipement), par les conditions hydrologiques lors des épisodes de dévalaison et par le comportement migratoire de l'anguille. Le dernier point (évaluation du taux d'échappement par le barrage au niveau d'un aménagement donné) procède de l'expertise au cas par cas et doit faire l'objet de façon prioritaire d'actions spécifiques dans le cadre du programme national R&D anguille.

BIBLIOGRAPHIE

- Baar N.N., 1903. Ein Beitrag zur Schädigung der Aale durch Turbinen und Mühlräder. *Fischerei Zeitung*: 6p.
- Bell M.C., 1991. Revised Compendium of the Success of Passage of Small Fish Through Turbines. Report to the U.S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division, Portland, Oregon.
- Berg R., 1985a. Turbinenbedingte Schäden an Fischen. Bericht über Versuche am Laufkraftwerk Neckarzimmern, Landesanstalt für Umweltschutz Baden – Würtemberg; Institut für Seenforschung und Fischereiwesen; 25p.
- Berg R., 1985b. Investigations on injuries of migrating eels caused by Kaplan turbines. Working party on Eel organized by C.E.C.P.I. (FAO), Perpignan: 13p.
- Berg R., 1986. Fish passage through Kaplan turbines at a power plant on the river Neckar and subsequent Eel injuries. *Vie milieu*, 36(4): 307-310.
- Berg, R.; 1987a. Fischereischäden durch Turbinen. Arbeiten des Deutschen Fischerei-Verbands; Vorträge der Aalkommission des DFV in Cuxhaven 1986: 41- 47.
- Berg R., 1987b. Gutachtliche Stellungnahme zu Fischschäden durch den Betrieb der Wasserkraftanlage "Am letzten Heller". Intern rapport Landesanstalt für Umweltschutz Baden – Würtemberg; Institut für Seenforschung und Fischereiwesen: 47p.
- Berg R., 1994a. Untersuchungen zur Vermeidung von Aalschäden an Turbinen. Arbeiten Dtsch. Fischereiverband, Vorträge der Aalkommission in Cuxhaven 1993: 23-35.
- Berg R.; 1994b. Untersuchungen mit Fischescheueinrichtungen am Kraftwerk Guttenbach. Fischereiforschungsstelle des Landes Baden –Würtemberg: 25p.
- Butschek V., Hofbauer J., 1956. Versuche über die Schädigung von Aalen durch Kaplanturbinen (Experiments on the injury of eels by Kaplan turbines). *Archiv für Fischereiwissenschaft*, 7(2): 178-184.
- Cada G.F., 2001. The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries*, 26(9):14-23.
- Couillard C.M., Hodson P.V., Castonguay M., 1997. Correlations between pathological changes and chemical contamination in American eels, *Anguilla rostrata*, from the St. Lawrence River. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 54: 1916-1927.
- Dekker W., 2004. Slipping through our hands: population dynamics of the European eel. In: PhD thesis. The Netherlands: University of Amsterdam: 186p.
- Desrochers D., 1995. Suivi de la migration de l'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*) au complexe Beauharnois. Par MILIEU & Associés Inc., pour le service Milieu naturel, vice-présidence Environnement, Hydro-Quebec : 107p.
- EPRI, 2001. Review and documentation of research and technologies on passage and protection of downstream migration of catadromous eels at hydroelectric facilities. Technical Report:270 p.
- Franke G.F., Webb D.R., Fisher R.K., Mathur Jr.D., Hopping P.N., March P.A., Headrick M.R., Lacro I.T., Ventikos Y., Sotiropoulos F., 1997. Development of environmentally advanced hydropower turbine system design concepts. Idaho National Engineering Laboratory. INEEL-EXT-97-00639.
- Gerhardt P., 1893. Über Aalleitern und Aalpässe. *Zeitschrift für Fischerei*, 1: 194-199.
- Haddingh R.H., Bakker H.D., 1998. Fish Mortality due to Passage through Hydroelectric Power Stations on the Meuse and Vecht Rivers. In: Jungwirth M., Schmutz S. & Weiss S. (eds.) *Fish migration and fish bypasses*, Fishing News Books, Oxford : 315-328.
- Haddingh R. H., Bruijs M.C.M., 2002. Hydroelectric power stations and fish migration. *Tribune de l'eau*, vol 55, nrs 619-620/5-6: 89-97.
- Hecker G.E., Cook T.C., 2005. Development and Evaluation of a New Helical Fish Friendly Hydro-Turbine. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 131 (10): 1-20.
- Holzner M., 2000. Untersuchungen über die Schädigungen von Fischen bei der Passage des Mainkraftwerks Dettelbach. Thèse TU München. 335 p.
- Jørgensen L., Kroll L., Oberwahrenbrock G.K., 1999. Die Aalabwanderung an der Staustufe Fankel/Mosel. Auswertung des Fischereiversuchs vom 04.09.1993 bis 12.12.1993.
- KEMA (Bakker H.D., Gerritsen J.J.), 1992. Schade aan vis als gevolg van passage door waterkrachtcentrale in de Maas bij Linne Deel I : AAL (*Anguilla anguilla* L.) 98263-MOB 92-3653: 76p.
- KEMA (Bruijs M.C.M., Polman H.J.G., Van Aerssen G.H.F.M., Haddingh R.H., Winter H.V., Deerenberg C., Jansen H.M., Schwevers U., Adam B., Dumont U., Kessels N.), 2003. Management of silver eel: Human impact on downstream migrating eel in the river Meuse, Final report Contract G5RS-2000-31141: 106p.
- Lagarrigue T., Voegtle B., Lascaux J.M., 2007. Tests d'évaluation des dommages subis par les juvéniles de salmonidés et les anguilles argentées en dévalaison lors de leur transit à travers le groupe turbogénérateur VLH installé sur le Tarn à Millau. Tests de décembre 2007 avec des anguilles argentées, Rapport ECOGEA pour F.M.F. : 25 p. + annexes.
- Larinier M., Dartiguelongue J., 1989. La circulation des poissons migrateurs: le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 312–313 (N° spécial): 94p.
- Larinier M., Travade F., 1999. La dévalaison des migrateurs: problèmes et dispositifs. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 353–354: 181-210.

- Lundbeck J., 1927. Untersuchungen über die Beschädigung von Fischen, besonders Aalen, in den Turbinen des Kraftwerks Friedland (Ostpreußen). *Zeitschrift für Fischerei*, 25: 439- 465.
- Monten E., 1985. Fish and turbines. Fish injuries during passage through power station turbines. Vattenfall, Stockholm: 111p.
- Normandeau Associates Inc. , 1998. Draft final report estimation of survival of American eel after passage through a turbine at the St. Lawrence-rdr power project, New York. Prepared for New York Power Authority.
- Normandeau Associates Inc. (J.R. Skalski) and Mid-Columbia Consulting Inc. 2000. Direct Survival and Condition of Juvenile Chinook Salmon Passed Through an Existing and New Minimum Gap Runner Turbines at Bonneville Dam First Powerhouse, Columbia River. Report to U.S. Army Corps of Engineers, Portland District, Portland, Oregon: 28p.
- Odeh M., 1999. A summary of environmentally friendly turbine design concept. U.U. Department of Energy. Idaho Operations Office rapport DOE/ID/13741, 39p.
- Otterstrøm C.V., 1936. Die Turbinen und die abwärtswandernden jungen Lachse und Forellen (sowie Aalen). 3.Teil. Journal du Conseil XI: 72-93.
- Otterstrøm C.V., 1942. Turbines and descending salmon and trout smolt (and eels), part IV Rep. Dan. Biol. Stat. XLVII: 27-37.
- Pavlov D.S., Lupandin A.I., Kostin V.V., 2002. Downstream Migration of Fish Through Dams of Hydroelectric Power Plants. Trans. T. Albert, trans. ed. G. F. Čada. ORNL/TR-02/02, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Ploskey G.R., Carlson T.J., 2004. Comparison of Blade-Strike Modeling Results with Empirical Data. PNLL-14603, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington.
- Scherrer B., 1984. Biostatistiques. Gaëtan Morin éditeur: 849p
- Schultze D., 1990. Versuche zur Ermittlung von Turbinenschäden an Aalen am Kraftwerk Wahnhausen. Arbeiten des Deutschen Fischereiverbands, 47: 12-24.
- Seifert K., 1989. Schadensgutachten zu Aalschäden unterhalb des Donaukraftwerks Geisling. (non publié): 24p.
- Subra S., Gomes P., Bory Y., Clave D, Larinier M., De oliveira E., Travade F., à paraître. Etude du franchissement par l'anguille argentée des ouvrages hydroélectriques du Gave de Pau- Suivi par radiopistage des rythmes de dévalaison et du franchissement des ouvrages hydroélectriques d'Artix, Biron, Castetarbe, Baigts et Puyoo. Rapport EDF R&D.
- Tomassone R., Lesquoi E., Millier C., 1983. La régression. Nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique. Masson, Paris : 180p.
- Turnpenny A.W.H., Clough S., Hanson K.P., Ramsay R., McEwan D., 2000. Risk Assessment for Fish Passage Through Small, Low-Head Turbines. Final Report. Energy Technical Support Unit, Harwell, United Kingdom.
- Vivier L., 1966. Turbines hydrauliques et leur régulation: Théorie, construction, utilisation. Albin Michel éditeur Paris : 581 p.
- Von Raben K., 1955. Kaplan-turbinen und Fische. *Die Wasserwirtschaft*, 45(8): 196-200.
- Von Raben K., 1964. "Regarding the problem of mutilations of fishes by hydraulic turbines." Originally published in *Die Wasserwirtschaft* (100):4:97, 1957. Fisheries Research Board of Canada Translation Series, No. 448: 12p.
- Von Raben K., 1957a. Über Turbinen und ihre schädliche Wirkung auf Fische. *Zeitschrift für Fischerei und deren Hilfswissenschaften* (Sonderdruck), 6(Heft 1-8): 171-182.
- Von Raben K., 1957b. Zur Beurteilung der Schädlichkeit der Turbinen für Fische. *Die Wasserwirtschaft*, 48: 60-63.
- Winter HV, Jansen HM, Bruijs MCM., 2006. Assessing the impact of hydropower and fisheries on downstream migrating silver eel, *Anguilla anguilla*, by telemetry in the River Meuse. *Ecology of Freshwater Fish* 2006: 15: 221–228.
- Winter, H. V., Jansen, H. M., and Breukelaar, A. W., 2007. Silver eel mortality during downstream migration in the River Meuse, from a population perspective. – *ICES Journal of Marine Science*, 64: 1444–1449.
- Wondrak P., 1989. Entschädigungsgrundlagen bei Turbinenschäden. *Fischer und Teichwirt*; 40(5): 135-138

ANNEXE I : FICHES BIBLIOGRAPHIQUES PAR AMENAGEMENT

□ NECKARZIMMERN

- **Référence :**

Berg R., 1985a. Turbinenbedingte Schäden an Fischen. Bericht über Versuche am Laufkraftwerk Neckarzimmern, Landesanstalt für Umweltschutz Baden – Württemberg; Institut für Seenforschung und Fischereiwesen; 25p.

Berg R., 1985b. Investigations on injuries of migrating eels caused by Kaplan turbines. Working party on Eel organized by C.E.C.P.I. (FAO), Perpignan: 13p.

Berg R., 1986. Fish passage through Kaplan turbines at a power plant on the River Neckar and subsequent eel injuries. *Vie milieu*, 36 (4): 307-310.

Berg R., 1987a. Fischereischäden durch Turbinen. Arbeiten des Deutschen Fischerei-Verbands; Vorträge der Aalkommission des DFV in Cuxhaven 1986: 41- 47.

Berg R., 1994a. Untersuchungen zur Vermeidung von Aalschäden an Turbinen. Arbeiten Dtsch. Fischereiverband, Vorträge der Aalkommission in Cuxhaven 1993: 23-35.

- **Localisation du site :**

Le taux de poissons blessés au passage d'une turbine « Kaplan » (verticale) a été estimé au cours d'études effectuées sur la rivière Neckar au sud-ouest de l'Allemagne, sur l'usine hydroélectrique de Neckarzimmern.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **5.3 m**. La turbine Kaplan testée a :

- une puissance nominale de 3.68 MW,
- un débit variant entre **40 m³/s et 80 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **83.4 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **4.2 m** (moyeu : 1.68 m) et comporte **5 pales** espacées de 2.64 m.

La vitesse périphérique est de 18.3 m/s et la vitesse spécifique est de 727 trs/min.

- **Méthodes :**

L'étude a été effectuée sur la dévalaison naturelle, sans aucun marquage ou étiquetage des poissons et sans introduction d'individus. Les poissons ayant transités par la turbine ont été repêchés à l'aide d'un filet spécial adapté en sortie de l'aspirateur (6.9 m x 15 m). Les blessures susceptibles d'être causées par le filet ont été minimisées par la longueur importante du filet (76m).

- **Résultats :**

Au total 2368 poissons (23 espèces) ont été récupérés dans le filet dont 11.5 % était des anguilles soit 272 anguilles. Les longueurs de ces anguilles varient de 50 cm à 85 cm, la majorité se situant entre 58 cm et 67 cm (taille moyenne de **62 cm**). Selon l'auteur la mortalité moyenne à pleine ouverture se situe à **25%** toutes tailles confondues. Pour un débit turbiné relativement faible en automne, le taux de mortalités atteint 50%.

Les tableaux suivants ont été reconstitués à partir des graphiques donnés par l'auteur dans ses publications.

Tableau 6 : Pourcentage d'anguilles blessées en fonction de l'angle d'ouverture des pales sur l'aménagement de Neckarzimmern

angle d'ouverture (β)	16	17	19	19	20	21	22	22	23	25	26
pourcentage d'anguilles blessées (N)	43	48	44	46	34	36	30	27	26	33	16

Tableau 7 : Tableau des effectifs des différents types de blessures sur les anguilles et du pourcentage de mortalité sur Neckarzimmern en fonction des classes de taille d'anguille.

classe de taille (cm)	nbre total d'anguilles attrapées	nbre coupées en deux	nbre fracture vertèbres	nbre total d'anguilles blessées	% ang blessées
25-28	1	0	1	0	0
28-31	7	0	0	1	14.28
31-34	1	0	0	0	0
34-37	0	0	0	0	0
37-40	4	2	0	2	50
40-43	2	1	0	0	0
43-46	4	0	0	2	50
46-49	1	0	2	0	0
49-52	3	2	0	2	66.67
52-55	8	2	0	2	25
55-58	15	4	6	3	20
58-61	49	15	13	15	30.61
61-64	58	2	6	28	48.27
64-67	43	6	3	12	27.91
67-70	22	1	3	6	27.27
70-73	18	4	4	6	33.33
73-76	17	0	0	8	47.06
76-79	1	0	0	1	100
79-82	1	2	0	0	0
82-85	6	3	0	5	83.33
85-88	1	0	0	0	0
total	262	44	38	93	35.5

• **Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation :**

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
1	Neckarzimmern	NECK1	3.68	5.3	5	4.2	83.4	18.3	2.64	80	25	0.62	100

□ BEAUHARNOIS

• Référence :

Desrochers D., 1995. Suivi de la migration de l'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*) au complexe Beauharnois, 1994, par MILIEU & Associés Inc., pour le service Milieu naturel, vice-présidence Environnement, Hydro-Quebec : 107 p.

• Localisation du site :

L'expérimentation a été réalisée durant l'été 1994, sur la centrale de Beauharnois située dans le haut Saint-Laurent à environ 280 km en aval des grands Lacs au Canada.

• Caractéristique de la turbine testée :

L'expérimentation sur la survie des anguilles en dévalaison qui traversent les turbines a été effectuée sur les deux types de turbines qui équipent la centrale (« Francis et « Hélice »). Cet aménagement est constitué de 36 turbines.

La hauteur de chute est de **23.8 m**. La turbine (n°33) Hélice verticale testée a :

- une puissance nominale de 54.7 MW,
- un débit maximal d'environ **265 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **94.7 trs/min**.

Le diamètre est de **6.39 m** et comporte **6 pales**. La vitesse périphérique est de 31.5 m/s.

• Méthodes :

Les poissons étaient injectés dans la turbine avec un dispositif de flottaison permettant de les récupérer dans le bief aval. Les anguilles utilisées avaient été d'abord pêchées dans le Saint-Laurent dans la région de Québec puis transportées en amont jusqu'à la centrale de Beauharnois.

• Résultats :

Les 122 anguilles injectées dans la turbine mesuraient en moyenne 88.1 cm pour un poids moyen de 1.395 kg. 95.5% (117) des poissons injectés ont été repêchés. Le taux de mortalité est estimé à 23.9% ± 7.8% pour un débit turbiné moyen de 243 m³/s (variation de 235 m³/s à 252 m³/s) soit une ouverture de turbine de 92%. Sur 117 poissons 28 ont des lésions mortelles (18 sont mortes immédiatement dont 17 sectionnées et 10 sont mortes après délais) et 5 n'ont jamais été récupérées. Le pourcentage de mortalité a été calculé à partir du nombre d'anguilles récupérées.

• Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
2	Beauharnois	BEAU1	54.7	23.8	6	6.39	94.7	31.5	3.35	265	23.9	0.881	92

□ LINNE

• Référence :

KEMA (Bakker H. D., Gerritsen J. J.), 1992. Schade aan vis als gevolg van passage door waterkrachtcentrale in de Maas bij Linne Deel I : AAL (*Anguilla anguilla* L.) 98263-MOB 92-3653: 76p.

Hadderingh R.H, Bakker H.D., 1998. Fish Mortality due to Passage through Hydroelectric Power Stations on the Meuse and Vecht Rivers. In: Jungwirth M., Schmutz S. & Weiss S. (eds.) Fish migration and fish bypasses, Fishing News Books, Oxford : 315-328.

Hadderingh R. H., Bruijs M.C.M, 2002. Hydroelectric power stations and fish migration. Tribune de l'Eau, vol 55, nrs 619-620/5-6 : 89-97.

KEMA (Bruijs M. C. M., Polman H. J. G., Van Aerssen G. H. F. M., Hadderingh R. H., Winter H. V., Deerenberg C., Jansen H. M., Schwevers U., Adam B., Dumont U., Kessels N.), 2003. Management of silver eel: Human impact on downstream migrating eel in the river Meuse, Final report Contract G5RS-2000-31141: 106p.

Winter H.V., Jansen H.M., Bruijs M.C.M., 2006. Assessing the impact of hydropower and fisheries on downstream migrating silver eel, *Anguilla anguilla*, by telemetry in the River Meuse. *Ecology of Freshwater Fish*,15: 221–228.

Winter H.V., Jansen H.M., Breukelaar A.W., 2007. Silver eel mortality during downstream migration in the River Meuse, from a population perspective. – *ICES Journal of Marine Science*, 64: 1444–1449.

• Localisation du site :

Les expérimentations ont été réalisées en automne 1990-printemps 1991, en 1999, en 2002 et en 2004 sur l'usine hydroélectrique de Linne sur la Meuse au Pays Bas à 68 km en aval de la frontière Belge.

• Caractéristique de la turbine testée :

Cet aménagement est constitué de quatre turbines « Kaplan » horizontales.

La hauteur de chute est de **4 m**. La turbine 4 testée a :

- une puissance nominale de 2.87 MW,
- un débit maximal d'environ **120 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **88.23 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **4 m** et comporte **3 pales**. La vitesse périphérique est de 18 m/s.

• Méthodes :

Pour les campagnes de 1990/1991, 1999 et 2002, les poissons passés naturellement sont capturés à la sortie de la turbine 4 à l'aide d'un filet. En 2002, une méthode par télémétrie a été en plus utilisée, basée sur la technique des transpondeurs (Nedap Trail System[®]). En 2004 seule la méthode par télémétrie à été utilisée.

• Résultats :

Avec méthode par capture au filet :

- De l'expérimentation effectué en 1990/1991 (KEMA, 1992 ; Hadderingh et Bakker, 1998 ; Hadderingh et Bruijs, 2002):

Lors de cette expérimentation, 16291 poissons de 18 espèces différentes ont été capturés, dont 4177 étaient des anguilles. Des pêches ont été effectuées en automne et au printemps. Pour les 17 échantillons réalisés au printemps 1991 la majorité des 4177 anguilles capturées étaient des anguilles jaunes, c'est la raison pour laquelle nous ne tiendrons pas compte de ces résultats.

Concernant les essais réalisés en automne 1990, sur 8150 poissons capturés, 1211 étaient des anguilles (dont 90% d'anguilles argentées) d'une longueur moyenne de 57 cm. Pour les anguilles, 22 opérations de pêche (échantillons) ont été effectuées. Le nombre moyen d'anguilles par échantillon était de 55. L'expérimentation a été réalisée pour trois ouvertures différentes (30 m³/s, 50 m³/s et 100 m³/s). Les taux de mortalités observés ont été respectivement de 22.8%, 9.9%, et 5.5% (moyenne de 13%). Le tableau suivant récapitule les résultats.

Tableau 8 : Tableau des résultats des essais réalisés sur Linne en 1990/1991

Débit (m ³ /s)	Poissons capturés		Poissons blessés	
	N	Longueur total (cm)	N	%
Automne 1990				
30	268	48.9	61	22.8
50	355	59.1	35	9.9
100	941	59.8	52	5.5
Printemps 1991				
30	339	43.3	29	8.6
50	2274	32.6	16	0.7

- De l'étude de 1999 (Haddingh et Bruijs, 2002):

Sur 25137 poissons capturés de 21 espèces, 2207 étaient des anguilles (dont 90% d'anguilles argentées) d'une longueur moyenne de 64.6 cm. Pour les anguilles, 53 échantillons ont été effectués. Le nombre moyen d'anguilles par échantillon était de 42.

Lors de cette expérimentation le débit a varié de 30 à 100 m³/s avec une mortalité variant de 9% à 30% (moyenne de 15.9%). Le tableau suivant et de synthèse récapitule les résultats.

Tableau 9 : Tableau des résultats des essais réalisés sur Linne en 1999

Débit (m ³ /s)	30	38	40	44	48	50	53	78	100
Nombre de poissons capturés	110					85			127
% de mortalité	25	19	30	16	9	16	16	9	9

- De l'étude de 2002 (KEMA, 2003):

À Linne, 30 échantillons ont été réalisés en trois jours d'intervalles. 1196 anguilles ont été attrapées, dont 16 anguilles jaunes et 1180 anguilles argentées d'une longueur moyenne de 64.74 cm (65 cm). Les résultats sont illustrés dans les tableaux suivants et le tableau de synthèse. Le pourcentage de **24,32 %** présenté est un maximum.

Tableau 10 : Pourcentage de blessures infligées par les turbines sur l'anguille tous débits confondus

stade	nombre total	pas de blessures	blessures					
			Nbre total		létales		non létales	
			n	%	n	%	n	%
anguille argentée	1180	776	404	34.24	287	24.32	117	9.92
anguille jaune	16	13	3	18.75	0	0	3	18.75
total	1196	789	407	34	287	24	120	10

Tableau 11 : Pourcentage de blessures infligées par les turbines sur l'anguille pour différents débits en fonction des tailles d'anguilles

Length class (cm)	Turbine flow ($m^3 \cdot s^{-1}$)										
	All flows		30			50			> 70		
	n eel	%	n eel	n lethal	%	n eel	n lethal	%	n eel	n lethal	%
20-29	0	0	0	0	-	0	0	-	0	0	-
30-39	16	0	14	0	-	2	0	-	0	0	-
40-49	36	22.2	20	5	25	16	3	18.8	0	0	-
50-59	358	19.3	246	57	23.2	112	12	10.7	0	0	-
60-69	400	24.8	244	72	29.5	154	27	17.5	2	0	-
70-79	317	29.3	165	49	29.7	147	42	28.6	5	2	40
80-89	63	22.2	29	9	31.0	33	4	12.1	1	1	100
90-99	6	66.7	5	3	60	0	0	-	1	1	100

Les dommages ont été classés en huit catégories, allant de l'absence de dommage au sectionnement total. Les taux de mortalité ont été déterminés en se basant sur la proportion des anguilles retrouvées mortes dans le filet auxquelles ont été rajoutées des anguilles encore en vie mais considérées comme non viables à terme (en particulier les individus ayant subi des dommages sévères à la colonne vertébrale, pouvant survivre mais incapables d'effectuer leur migration de reproduction suite à leur mobilité réduite). Une mortalité supplémentaire après délais (après par exemple 48 h) n'a pas été étudiée mais n'est pas à exclure.

Le tableau et la figure suivante présentent la synthèse des résultats sur les 3 campagnes d'échantillonnage (1990, 1999 et 2002).

Tableau 12 : Tableau (synthèse) de la relation entre le taux de mortalité et le débit turbiné pour les trois expérimentations (1990, 1999 et 2002)

débit turbiné (m^3/s)	Nbre total d'anguilles			longueur moyenne (cm)			mortalité en % (code essai)		
	1990	1999	2002	1990	1999	2002	1990	1999	2002
30	268	110	723	48.9	60.8	63.3	22.8	25	26.97
50	355	85	464	59.1	62.8	65.9	9.9	16	18.97
95	/	/	7	/	/	75.3	/	/	42.9*
100	941	127	/	59.8	64.7	/	5.5	9	/

*Attention : le taux de mortalité en 2002 pour un débit de 95 m^3/s n'est pas fiable en raison de la taille peu importante de l'échantillon (n=7)

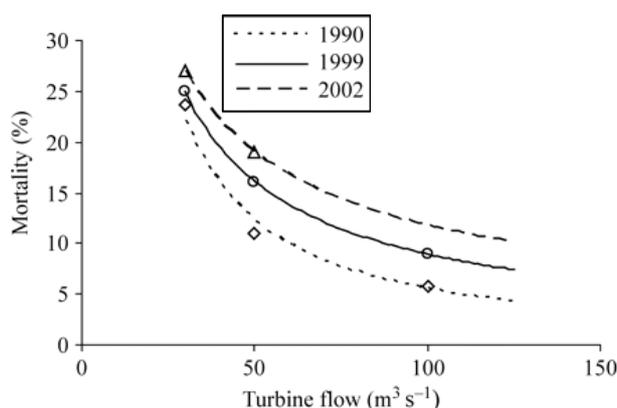


Figure 25 : Graphique des taux de mortalité obtenues lors des expérimentations de 1990, 1999 et 2002 en fonction des débits turbinés.

Avec méthode par télémétrie :

Lors de deux expérimentations effectuées en 2002 et 2004, 18 stations de détection ont été installées sur le cours d'eau et à l'entrée des 2 turbines des 2 aménagements testés (Linne et Alphen) afin d'identifier les différentes sources de mortalité lors de la dévalaison de l'anguille. Pour chaque campagne 150 anguilles capturées par les pêcheurs professionnels dans la Meuse ont été marquées par des transpondeurs Nedap implantés chirurgicalement et relâchées à Ohé en Laak. Leur longueur variait entre 64 et 93 cm (moyenne 74.5 cm).

- De l'étude de 2002 (KEMA, 2003 ; Winter et al., 2006 ; Winter et al., 2007):

A Linne sur les 121 anguilles se présentant à l'aménagement, de 54 à 90 des anguilles passent par les turbines, 8 sont mortes au pied des turbines soit un taux de mortalité immédiate variant de 9% à 15%. Cependant les auteurs estiment qu'une fraction des anguilles ayant transité par les turbines autres que celles retrouvées mortes au pied des usines sont susceptibles, tout en étant mortellement blessées et non viables à terme, de franchir plusieurs obstacles avant de mourir. Ce taux de mortalité différée pour les deux ouvrages cumulés a été estimé entre 7% et 17% pour toutes ouvertures de pales confondues.

- De l'étude de 2004 (Winter et al., 2007):

A Linne, sur les 105 anguilles se présentant à l'aménagement 91 à 68 des anguilles passent par les turbines, 6 sont mortes directement soit un taux de mortalité immédiate variant de 6% à 9%. Le taux de mortalité différée supplémentaire pour les deux ouvrages cumulés a été estimé variant entre 4% et 13%, toutes ouvertures de pales confondues.

On constate que la méthode par télémétrie peut sous estimer largement la mortalité dans la mesure où elle ne permet de considérer comme mortes que les anguilles restant au pied de l'ouvrage, alors qu'une proportion non négligeable des anguilles ayant transité par les turbines peuvent continuer à dévaler un certain temps et franchir plusieurs obstacles avant de mourir. Au vu de ces considérations, les données sur les mortalités immédiates constatées en pied d'ouvrage obtenues par la télémétrie ne seront pas utilisées pour les régressions.

- **Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:**

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
5	Linne	LINN1	2.87	4	3	4	88.23	18	4.19	100	5.5	0.598	100
8	Linne	LINN4	2.87	4	3	4	88.23	18	4.19	100	9	0.647	100

□ ALPHEN-LITH

• Référence :

KEMA (Bakker H. D., Gerritsen J. J.), 1992. Schade aan vis als gevolg van passage door waterkrachtcentrale in de Maas bij Linne Deel I : AAL (*Anguilla anguilla* L.) 98263-MOB 92-3653: 76p.

KEMA (Bruijs M. C. M., Polman H. J. G., Van Aerssen G. H. F. M., Hadderingh R. H., Winter H. V., Deerenberg C., Jansen H. M., Schwevers U., Adam B., Dumont U., Kessels N.), 2003. Management of silver eel: Human impact on downstream migrating eel in the river Meuse, Final report Contract G5RS-2000-31141: 106p.

Winter H.V., Jansen H.M., Bruijs M.C.M., 2006. Assessing the impact of hydropower and fisheries on downstream migrating silver eel, *Anguilla anguilla*, by telemetry in the River Meuse. *Ecology of Freshwater Fish*, 15: 221–228.

Winter H.V., Jansen H.M., Breukelaar A.W., 2007. Silver eel mortality during downstream migration in the River Meuse, from a population perspective. – *ICES Journal of Marine Science*, 64: 1444–1449.

• Localisation du site :

L'usine hydroélectrique d'Alphen (Lith) se situe sur la Meuse au Pays Bas.

• Caractéristique de la turbine testée :

Cet aménagement est constitué de 4 groupes bulbes.

La hauteur de chute est de **4.60 m**. La turbine testée a :

- un débit maximal d'environ **120 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **94 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **4 m** et comporte **3 pales**. La vitesse périphérique est de 19.7 m/s.

• Méthodes :

En 2002 (KEMA, 2003) et 2004 (Winter et al., 2007), la méthode par télémétrie basée sur la technique des transpondeurs (Nedap Trail System[®]) a été utilisée pour obtenir des informations sur les dommages cumulés de deux centrales (Linne et Alphen).

On a pu aussi obtenir des informations données par un pêcheur professionnel (du 1 au 31 août 1990) (KEMA, 1992).

• Résultats :

➤ Estimation de la mortalité par méthode télémétrique :

Lors de deux expérimentation effectuées en 2002 et 2004, 18 stations de détection ont été installées sur le cours d'eau et à l'entrée des 2 turbines des 2 aménagements testées (Linne et Alphen) afin d'identifier les différentes sources de mortalité lors de la dévalaison de l'anguille. Pour chaque campagne 150 anguilles capturées par les pêcheurs professionnels dans la Meuse ont été marquées par des transpondeurs Nedap implantés chirurgicalement et relâchées à Ohé en Laak. Leur longueur variait entre 64 et 93 cm (moyenne 74.5 cm).

- De l'étude de 2002 (KEMA, 2003 ; Winter et al., 2006 ; Winter et al., 2007):

A Alphen sur les 74 anguilles se présentant à l'aménagement 27 à 46 des anguilles passent par les turbines, 3 sont mortes directement soit un taux de mortalité immédiate variant de 6% à 11%. Cependant les auteurs estiment qu'une fraction des anguilles ayant transité par les turbines autres que celles retrouvées mortes au pied des usines sont susceptibles, tout en étant mortellement blessées et non viables à terme, de franchir plusieurs obstacles avant de mourir. Ce taux de mortalité différée a été estimé globalement pour les deux ouvrages entre 7% et 17% pour toutes ouvertures de pales confondues.

- De l'étude de 2004 (Winter et al., 2007):

A Alphen sur les 76 anguilles se présentant à l'aménagement 44 à 59 des anguilles passent par les turbines, 15 sont mortes directement soit un taux de mortalité immédiate variant de 25% à 34%. Cependant les auteurs estiment qu'une fraction des anguilles passant par les turbines autres que celles mortes au pied des usines peuvent être mortellement blessées et franchir plusieurs obstacles avant de mourir. Ce taux de mortalité différée a été estimé globalement entre 4% et 13% pour toutes ouvertures de pales confondues.

- Estimation de la mortalité par données issues d'un pêcheur :

D'après les informations du pêcheur professionnel, la mortalité serait de **19%** pour une taille d'anguilles de **55 cm**. On fera l'hypothèse que l'ouverture de la turbine est importante.

- **Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:**

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
14	Alphen/Lith	LITH1	4.3	4.6	3	4	94	19.7	4.19	120	19	0.55	

□ HAANDRICK

• Référence :

Haddingh R.H, Bakker H.D., 1998. Fish Mortality due to Passage through Hydroelectric Power Stations on the Meuse and Vecht Rivers. In: Jungwirth M., Schmutz S. & Weiss S. (eds.) Fish migration and fish bypasses, Fishing News Books, Oxford : 315-328.

• Localisation du site :

L'aménagement hydroélectrique d'Haandrick se situe sur la Vecht (Pays-Bas) à 150 km de la mer du Nord.

• Caractéristique de la turbine testée :

Cet aménagement est constitué d'une turbine « Kaplan » verticale.

La hauteur de chute est de **2 m**. La turbine testée a :

- une puissance nominale de 0.1 MW,
- un débit maximal d'environ **7 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **150 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **1.6 m** et comporte **4 pales**. La vitesse périphérique est de 13 m/s.

• Méthodes :

Lors de cet étude réalisée en automne 1988, les poissons ont été collectés avec deux **filets** de 10 m de long avec une ouverture de 5.2 m par 1.5 m placés à la sortie de la turbine (un filet à chaque sortie de la turbine) lors de 26 nuits d'échantillonnage. Entre le 1 août et le 8 octobre 1988, la sortie de la turbine a été échantillonnée 36 fois. Chaque effort d'échantillonnage a eu lieu la nuit et a durée environ 10h.

• Résultats :

4000 poissons de 13 espèces différentes ont été collectés dont des anguilles constituées majoritairement d'individus argentés (92% pour 8% d'anguilles jaunes). La distribution des fréquences de taille est caractérisée par deux modes, le premier à 40 cm (mâles) et le second à 52 cm (femelles).

Sur 543 anguilles capturées (longueur moyenne de **47 cm**), **24%** (133) ont subi des dommages. La plupart des anguilles blessées ont été coupées en deux.

Les essais ont été effectués à pleine ouverture.

• Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
13	Haandrick	HAAN1	0.1	2	4	1.6	150	13	1.26	7	24	0.47	100

□ SAINT LAWRENCE FDR POWER PROJECT

• Référence :

Normandeau Associates Inc., Skalski J.R., 1998. Draft final report estimation of survival of American eel after passage through a turbine at the St. Lawrence-fdr power project, New York. Prepared for New York Power Authority.

• Localisation du site :

L'aménagement de St. Lawrence-fdr est localisé dans le nord de New York sur la portion internationale du fleuve St Lawrence à l'aval du lac Ontario. Il est constitué du barrage hydroélectrique de Robert Moses et de l'usine de Robert H. Saunders.

• Caractéristique de la turbine testée :

La centrale de Robert Moses est constituée de 16 turbines « hélice ». La hauteur de chute est de **24.6 m**. La turbine testée a :

- une puissance nominale de 57 MW,
- un débit maximal de **275 m³/s** (variant de 240 m³/s à 271 m³/s (moyenne : **255 m³/s**),
- une vitesse de rotation de **94.7 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **6.1 m** et comporte **6 pales**. La vitesse périphérique est de 29.6 m/s. Les caractéristiques de cette turbine sont proches de celles de Beauharnois.

• Méthodes :

En 1997, des **marques ballons** (HI-Z tags®) et des émetteurs radio ont été fixés sous anesthésie électrique sur des anguilles provenant d'une pêcherie commerciale sur la rivière Richelieu (Québec). Un certain nombre d'individus ont été introduits dans l'une des turbines à deux profondeurs et un lot de contrôle a été lâché à la sortie. Ces ballons en latex étaient remplis de produits chimiques juste avant le passage des anguilles dans la turbine qui généraient la formation de gaz (après 20 à 30 s) gonflant alors le ballon et permettant ainsi de capturer les poissons à la sortie.

• Résultats :

Pour le lot de contrôle, sur les 134 individus placés à l'aval, 127 ont été recapturés (vivants) et sur les 7 non récupérés : 2 étaient morts, 3 étaient vivants (dont 2 morts après 88 h), et 2 dont le devenir était inconnu.

Concernant le lot test, constitué de 240 anguilles dont la taille variait de 81 à 114 cm (moyenne **102 cm**), 207 (86.3%) ont été récupérées dont 179 vivantes (dont 15 mortes après 88 h) et 28 mortes immédiatement (11.7%). Sur les 33 individus non récupérés, 3 (1.3%) sont considérés comme morts (car seul le ballon a été récupéré), 9 (3.8%) sont considérés comme morts car ils étaient inactifs (devenir connu grâce à la radio télémétrie), 12 (5%) étaient actifs, et 9 (3.8%) dont le devenir était inconnu.

L'estimation des probabilités de mortalité avec 90% d'intervalle de confiance est de 16% pour la mortalité immédiate, de **26.5%** pour la mortalité à 88 h et 25% pour la mortalité à 88 h en émettant l'hypothèse que les poissons classés comme vivants par la radiotélémétrie étaient vivants à 88 h.

• Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
15	Robert Moses St Law	FDR1	57	24.6	6	6.096	94.7	29.6	3.19	275	25	1.02	100

□ ANGABÄCK

- **Référence :**

Monten E., 1985. Fish and turbines. Vattenfall, Stockholm : 111p.

- **Localisation du site :**

Angabäck est une centrale hydroélectrique qui se situe sur la rivière Lagan en Suède.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **6 m**. La turbine Kaplan testée a :

- une puissance nominale de 3.17 MW,
- un débit maximal de **60 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **125 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **3.3 m** et comporte **4 pales**. La vitesse périphérique est de 21.6 m/s.

- **Méthodes :**

Cette étude a été réalisée durant le printemps 1961, où des anguilles et des saumons ont été relâchés en amont de la station et capturés à la sortie des turbines à l'aide d'un filet fixé sur l'aspirateur de la turbine.

- **Résultats :**

Il a été réalisé trois essais, pour 100%, 83% et 67% du débit maximal. La taille moyenne des anguilles relâchées était de **0.735 m**. Les principaux résultats sont donnés dans le tableau suivant où sont portés les pourcentages d'anguilles blessées en fonction des nombres recapturés et lâchés :

Tableau 13 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Angabäck par Monten

Pourcentage du débit max (%)	Débit (m ³ /s)	Taille moyenne des anguilles (m)	Nombre d'individus lâchés	Nombre d'individus récupérés	taux de recapture (%)	Pourcentage d'indiv. blessés (récupérés) (%)	Nombre. indiv. récupérés blessés	Pourcentage d'indiv. blessés (lâchés) (%)
100	60	0.735	50	47	94	40	19	38
83	50	0.735	19	11	58	45	5	26
67	40	0.735	40	28	70	63	17.63	44

- **Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:**

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
20	Ângabäck	ANG20	2.7	6	4	3.3	125	21.6	2.59	60	26	0.735	83
21	Ângabäck	ANG30	3.17	6	4	3.3	125	21.6	2.59	60	38	0.735	100

□ LANGGÖL

- **Référence :**

Monten E., 1985. Fish and turbines. Vattenfall, Stockholm : 111p.

- **Localisation du site :**

Langgöl est une centrale hydroélectrique qui se situe sur la rivière Ronnebyan en Suède.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **11.5 m**.

La turbine Kaplan testée a :

- une puissance nominale de 0.558 MW,
- un débit maximal de **12 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **375 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **1.3 m** et comporte **4 pales**. La vitesse périphérique est de 25.5 m/s.

- **Méthodes :**

Cette étude a été réalisée durant l'automne et l'été 1960, où des anguilles ont été relâchées en amont de la station et capturées à la sortie des turbines à l'aide d'un filet.

- **Résultats :**

Au total 4 essais ont été effectués sur les anguilles pour 2 tailles moyennes différentes (0.735 et 0.565 m) et 2 débits différents pour chaque taille (46% et 100% du débit maximal). Les principaux résultats sont donnés dans le tableau suivant où sont portés les pourcentages d'anguilles blessées en fonction des nombres recapturés et lâchés :

Tableau 14 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Langgöl par Monten

Pourcentage du débit max (%)	Débit (m ³ /s)	Taille des anguilles (m)	Nombre d'individus lâchés	Nombre d'individus récupérés	taux de recapture (%)	Pourcentage d'indiv. blessés (récupérés) (%)	Nombre. indiv. récupérés blessés	Pourcentage d'indiv. blessés (lâchés) (%)
100	12	0.735	40	37	92	97.8	36	90
46	5.5	0.735	73	62	85	89.8	55.6	76
100	12	0.565	50	48	96	75	36	72
46	5.5	0.565	50	47	94	80.8	38	76

- **Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:**

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
27	Langgöl	LANG20	0.558	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	12	72	0.565	100
29	Langgöl	LANG40	0.558	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	12	90	0.735	100

□ KARLSNAS

- **Référence :**

Monten E., 1985. Fish and turbines. Vattenfall, Stockholm : 111p.

- **Localisation du site :**

Karlsnäs est une centrale hydroélectrique qui se situe sur la rivière Ronnebyan en Suède.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **6 m**.

La turbine Kaplan testée a :

- une puissance nominale de 0.583 MW,
- un débit maximal d'environ **13 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **250 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **1.6 m** et comporte **4 pales**. La vitesse périphérique est de 21 m/s.

- **Méthodes :**

Durant l'été 1960, des anguilles ont été relâchées en amont de la station et capturées à la sortie des turbines à l'aide d'un filet.

- **Résultats :**

Au total 2 essais ont été effectués sur des anguilles de **0.735 m** de long en moyenne. Ces essais correspondent pour chaque taille à 2 débits différents (85% et 92% du débit maximal). Les principaux résultats sont donnés dans le tableau suivant où sont portés les pourcentages d'anguilles blessées en fonction des nombres recapturés et lâchés. Dans la dernière ligne de ce tableau on a regroupé les deux essais.

Tableau 15 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Karlsnas par Monten

Pourcentage du débit max (%)	Débit (m3/s)	Taille des anguilles (m)	Nombre d'individus lâchés	Nombre d'individus récupérés	taux de recapture (%)	Pourcentage d'indiv. blessés (récupérés) (%)	Nombre. indiv. récupérés blessés	Pourcentage d'indiv. blessés (lâchés) (%)
85	11	0.735	50	30	60	88	26.4	52.8
92	12	0.735	25	17	68	83	14	56
85-92 (88.5)	11-12	0.735	75	47	63	86	40.4	53.9

- **Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:**

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
33	Karlsnäs	KARL10	0.583	6	4	1.6	250	21	1.26	13	52.8	0.735	85
34	Karlsnäs	KARL20	0.583	6	4	1.6	250	21	1.26	13	56	0.735	92

□ GUSTAVSBERGS

- **Référence :**

Monten E., 1985. Fish and turbines. Vattenfall, Stockholm : 111p.

- **Localisation du site :**

Gustavsbergs est une centrale hydroélectrique qui se situe sur la rivière Kilaan (un affluent de la Nissan) en Suède.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **11.5 m**.

La turbine Kaplan testée a :

- un débit maximal de **11 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **375 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **1.3 m** (moyeu : 0.5m) et comporte **4 pales**. La vitesse périphérique est de 25.5 m/s.

- **Méthodes :**

Durant le printemps 1960, des anguilles ont été relâchées en amont de la station et capturées à la sortie des turbines à l'aide d'un filet.

- **Résultats :**

Quatre tests ont été réalisés lors de cette étude pour des anguilles dont la taille était en moyenne de 0.735 m pour des débits de 29%, 54%, 75% et 86% du débit maximal. Les principaux résultats sont donnés dans le tableau suivant où sont portés les pourcentages d'anguilles blessées en fonction des nombres recapturés et lâchés. Dans la dernière ligne de ce tableau on a regroupé les deux derniers essais.

Tableau 16 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Gustavsbergs par Monten

Pourcentage du débit max (%)	Débit (m ³ /s)	Taille des anguilles (m)	Nombre d'individus lâchés	Nombre d'individus récupérés	taux de recapture (%)	Pourcentage d'indiv. blessés (récupérés) (%)	Nombre. indiv. récupérés blessés	Pourcentage d'indiv. blessés (lâchés) (%)
29	3.2	0.735	25	17	68	99	16.8	68
54	6	0.735	25	19	76	98	18.6	74
75	8.3	0.735	10	10	100	100	10	100
86	9.5	0.735	25	24	96	91	21.84	87
75-86 (80)	8.3-9.5 (89)	0.735	35	34	97	94	32	91

- **Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:**

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
43	Gustavsberg	GUST30	0.842	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	11	100	0.735	75
44	Gustavsberg	GUST40	0.964	11.5	4	1.3	375	25.5	1.02	11	87	0.735	86

□ EMSFORS

- **Référence :**

Monten E., 1985. Fish and turbines. Vattenfall, Stockholm : 111p.

- **Localisation du site :**

Emsfors est une centrale hydroélectrique qui se situe sur la rivière Helgean en Suède.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **6 m**.

La turbine Kaplan testée a :

- une puissance nominale de 0.662 MW,
- un débit maximal proche de **22 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **187 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **1.95 m** (moyeu : 0.875m) et comporte **4 pales** espacées de 1.53 m. La vitesse périphérique est de 19.1 m/s.

- **Méthodes :**

Durant l'automne 1960, des anguilles ont été relâchées en amont de la station et capturées à la sortie des turbines à l'aide d'un filet.

- **Résultats :**

Deux essais ont été réalisés lors de cette étude, un essai pour des anguilles en moyenne de **0.565 m** de long et pour 57 % du débit maximal et un autre essai pour une taille moyenne de **0.735 m** avec 83 % du débit. Les principaux résultats sont donnés dans le tableau suivant où sont portés les pourcentages d'anguilles blessées en fonction des nombres recapturés et lâchés.

Tableau 17 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Emsfors par Monten

Pourcentage du débit max (%)	Débit (m ³ /s)	Taille des anguilles (m)	Nombre d'individus lâchés	Nombre d'individus récupérés	taux de recapture (%)	Pourcentage d'indiv. blessés (récupérés) (%)	Nombre. indiv. récupérés blessés	Pourcentage d'indiv. blessés (lâchés) (%)
87	19.1	0.735	40	25	62	75	19	47.5
57	12.5	0.565	30	19	63	63	12	40

- **Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:**

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
49	Emsfos	EMSF20	0.662	6	4	1.95	187	19.1	1.53	22	47.5	0.735	87

□ NOBBELOV

- **Référence :**

Monten E., 1985. Fish and turbines. Vattenfall, Stockholm : 111p.

- **Localisation du site :**

Nöbbelev est une centrale hydroélectrique qui se situe sur la rivière Helgean en Suède.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **10 m**. La turbine Kaplan testée a :

- un débit maximal proche de **23 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **250 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **1.94 m** (moyeu : 0.74m) et comporte **4 pales** espacées de 1.52 m. La vitesse périphérique est de l'ordre de 25.4 m/s.

- **Méthodes :**

Durant l'automne 1960, des anguilles ont été relâchées en amont de la station et capturées à la sortie des turbines à l'aide d'un filet.

- **Résultats :**

Deux tests ont été réalisés pour des débits de 72% et 98% du débit maximal pour des anguilles dont la taille était en moyenne de **0.735 m**. Les principaux résultats sont donnés dans le tableau suivant où sont portés les pourcentages d'anguilles blessées en fonction des nombres recapturés et lâchés.

Tableau 18 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Nöbbelov par Monten

Pourcentage du débit max (%)	Débit (m ³ /s)	Taille des anguilles (m)	Nombre d'individus lâchés	Nombre d'individus récupérés	taux de recapture (%)	Pourcentage d'indiv. blessés (récupérés) (%)	Nombre. indiv. récupérés blessés	Pourcentage d'indiv. blessés (lâchés) (%)
72	16.5	0.735	20	11	55	83.8	9	45
98	22.5	0.735	40	37	92	72.8	27	67.5

- **Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:**

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
52	Nöbbelev	NOBB10	1.45	10	4	1.94	250	21	1.52	23	45	0.735	72
53	Nöbbelev	NOBB20	1.98	10	4	1.94	250	25.4	1.52	23	67.5	0.735	98

□ **BROBY**

• **Référence :**

Monten E., 1985. Fish and turbines. Vattenfall, Stockholm : 111p.

• **Localisation du site :**

Broby est une centrale hydroélectrique qui se situe sur la rivière Helgean en Suède.

• **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **9 m**. La turbine Kaplan testée a :

- une puissance nominale de 1.35 MW,
- un débit maximal proche de **23 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **250 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **2.06 m** (moyeu : 0.815m) et comporte **4 pales** espacées de 1.62 m. La vitesse périphérique est de 27 m/s.

• **Méthodes :**

Durant l'automne 1960, des anguilles ont été relâchées en amont de la station et capturées à la sortie des turbines à l'aide d'un filet.

• **Résultats :**

Deux tests ont été réalisés pour des débits de 74% et 96% du débit maximal. La taille des anguilles était en moyenne de **0.735 m**. Les principaux résultats sont donnés dans le tableau suivant où sont portés les pourcentages d'anguilles blessées en fonction des nombres recapturés et lâchés :

Tableau 19 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Broby par Monten

Pourcentage du débit max (%)	Débit (m ³ /s)	Taille des anguilles (m)	Nombre d'individus lâchés	Nombre d'individus récupérés	taux de recapture (%)	Pourcentage d'indiv. blessés (récupérés) (%)	Nombre. indiv. récupérés blessés	Pourcentage d'indiv. blessés (lâchés) (%)
74	17	0.735	48	38	79	81.2	31	64.6
96	22	0.735	40	35	87	73.8	26	65

• **Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:**

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
56	Broby	BROB10	1.35	9	4	2.06	250	27	1.62	23	64.6	0.735	74
57	Broby	BROB20	1.35	9	4	2.06	250	27	1.62	23	65	0.735	96

□ KVARNAHOLM

- **Référence :**

Monten E., 1985. Fish and turbines. Vattenfall, Stockholm : 111p.

- **Localisation du site :**

Kvarnaholm est une centrale hydroélectrique qui se situe sur la rivière Lagan en Suède.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **7.5 m**. La turbine Kaplan testée a :

- une puissance nominale de 3.3 MW,
- un débit maximal proche de **50 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **150 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **3 m** (moyeu : 1.2 m) et comporte **4 pales**. La vitesse périphérique est de l'ordre de 23.6 m/s.

- **Méthodes :**

Cette étude a été réalisée durant le printemps 1961, où des anguilles et des saumons ont été relâchés en amont de la station et capturés à la sortie des turbines à l'aide d'un filet.

- **Résultats :**

Trois tests ont été réalisés pour des débits de 60%, 80% et 100% du débit maximal et pour des anguilles dont la taille était en moyenne de 0.735 m. Les principaux résultats sont donnés dans le tableau suivant où sont portés les pourcentages d'anguilles blessées en fonction des nombres recapturés et lâchés.

Tableau 20 : Tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés sur Kvarnaholm par Monten

Pourcentage du débit max (%)	Débit (m ³ /s)	Taille des anguilles (m)	Nombre d'individus lâchés	Nombre d'individus récupérés	taux de recapture (%)	Pourcentage d'individ. blessés (récupérés) (%)	Nombre. indiv. récupérés blessés	Pourcentage d'individ. blessés (lâchés) (%)
60	30	0.735	30	24	80	92	22	73.3
80	40	0.735	42	31	74	51	16	38.1
100	50	0.735	24	21	87	61	13	54.2

- **Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:**

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
62	Kvarnaholm	KVAR20	2.64	7.5	4	3	150	23.6	2.36	50	38.1	0.735	80
63	Kvarnaholm	KVAR30	3.3	7.5	4	3	150	23.6	2.36	50	54.2	0.735	100

□ DETTELBACH

- **Référence :**

Holzner M., 2000. Untersuchungen über die Schädigungen von Fischen bei der Passage des Mainkraftwerks Dettelbach. Thèse TU München. 335 p.

- **Localisation du site :** Dettelbach est une centrale hydroélectrique qui se situe en Allemagne sur le Main, affluent de rive droite du Rhin.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

Cet aménagement est équipé de deux turbines Kaplan (verticales). La hauteur de chute est de **4.65 m**. La turbine testée a :

- une puissance nominale proche de 2.5 MW,
- un débit maximal proche de **65 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **100 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **3.54 m** et comporte **4 pales**. La vitesse périphérique est de l'ordre de 18.5 m/s.

- **Méthodes :**

Durant octobre 1996 à novembre 1999 des filets ont été placés derrière les turbines pendant 122 jours durant les principales périodes de migrations des différentes espèces de poissons présents dans la rivière. L'ouverture des mailles diminuait progressivement de 100 mm dans la partie amont du filet à 18 mm en queue de filet. Les nasses situées à l'extrémité du dispositif de capture, offrant aux poissons un espace leur permettant de nager, étaient constituées d'un matériau énoû (ouverture de maille de 10 mm ou 4 mm) destiné à assurer un abri pour les poissons. Ces nasses étaient maintenues ouvertes par plusieurs anneaux d'aluminium.

Un simple examen de la prise a permis d'isoler les poissons blessés ou à mobilité extrêmement réduite. La levée du dispositif de capture a été effectuée à intervalles réguliers (le plus souvent toutes les deux ou quatre heures), en fonction de la quantité de matériaux flottants récoltée. Les données concernant les poissons ont été collectées et saisies directement après la prise sur le ponton de travail. Les poissons vivants ont ensuite été stockés dans des bassins afin de pouvoir évaluer les mortalités différées.

La saisie des données liées aux lésions observées sur les poissons capturés s'est effectuée en deux étapes. Tout d'abord, les lésions externes visibles des poissons ont été réparties en cinq catégories. Ensuite, chaque poisson capturé a été affecté à une classe définie en fonction du type de lésion et de plus chaque lésion individuelle (par exemple, saignement de l'œil ou lésion des nageoires) été enregistrée dans une base. Il est ainsi possible qu'un poisson apparaisse plusieurs fois lors de la saisie des lésions individuelles car il présente simultanément des blessures au niveau des nageoires, des écailles et des yeux. L'affectation du poisson à une classe de lésions définie n'est pas pour autant remise en cause. Les lésions internes relativement discrètes des anguilles ont ainsi pu particulièrement être étudiées, tant par le biais d'une observation externe continue, comme la palpation des parties du corps susceptibles d'être touchées, ou de l'observation du comportement lors de la nage. Les poissons les plus touchés ont alors été ouverts afin de détecter les lésions internes.

Après enregistrement des données morphométriques et relatives aux lésions, un échantillon choisi au hasard ou l'ensemble (suivant le nombre de poissons capturés) des poissons non blessés mortellement ont été stockés afin de pouvoir mettre en évidence toute séquelle consécutive au passage dans les turbines.

• **Résultats :**

Au total 32407 poissons de 28 espèces différentes ont été capturés dont 3718 anguilles d'une longueur comprise entre 10 et 110 cm. Tous les individus ont subi un examen externe après capture. Toutes les lésions externes visibles ont été prises en compte, indépendamment de la cause supposée (turbine, dispositif de capture, maniement).

Les dommages sont classés en cinq catégories : 1. Aucune lésion externe visible à l'œil nu; 2. Perte d'écaillés, abrasions, saignements ; 3. Fractures, lésions de la colonne vertébrale visibles à l'œil nu, blessures charnues ; 4. Sectionnements partiels, parties encore solidaires ; 5. Sectionnements complets, amputations. Le tableau montre le taux de blessures par catégorie et le taux de mortalité moyen pour les anguilles d'une longueur de 0.5 à 0.6 m (moyenne 0.55 m).

Tableau 21 : Taux de blessures par catégorie et taux de mortalité moyen pour des anguilles d'une longueur de 0.55 m

taux (moyen) de blessures en %					taux (moyen) de mortalités en %
cl.1	cl.2	cl.3	cl.4	cl.5	
52	24	13	6	4	28

On a pu constater que plus la taille des poissons passés à travers la turbine est importante, plus les blessures infligées se sont avérées mortelles.

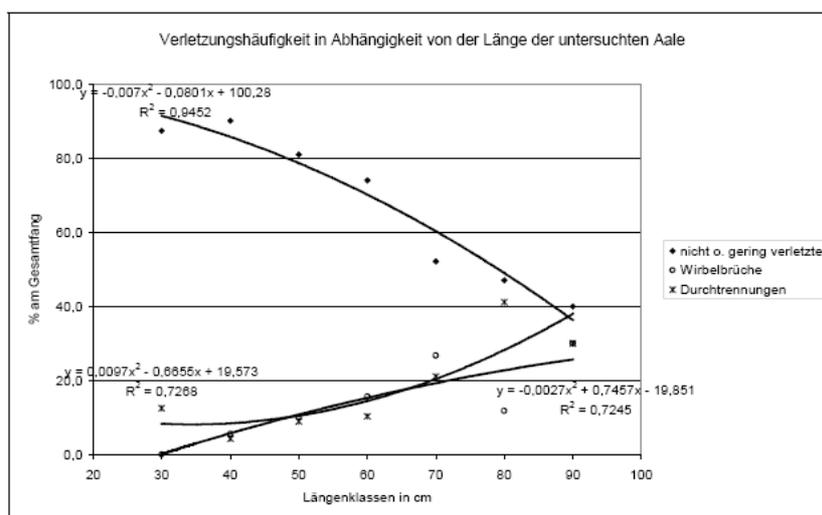


Figure 26 : Fréquence des lésions en fonction de la taille des anguilles capturées

A partir de ce graphique donné par l'auteur il a pu être possible de récupérer des données de mortalité en fonction de la taille des anguilles. Le tableau suivant synthétise ces données :

Tableau 22 : Taux de mortalité observés sur Dettelbach en fonction des tailles d'anguille

taille des anguilles (m)	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
taux de mortalité (%)	12	10	19	25	47	53	60

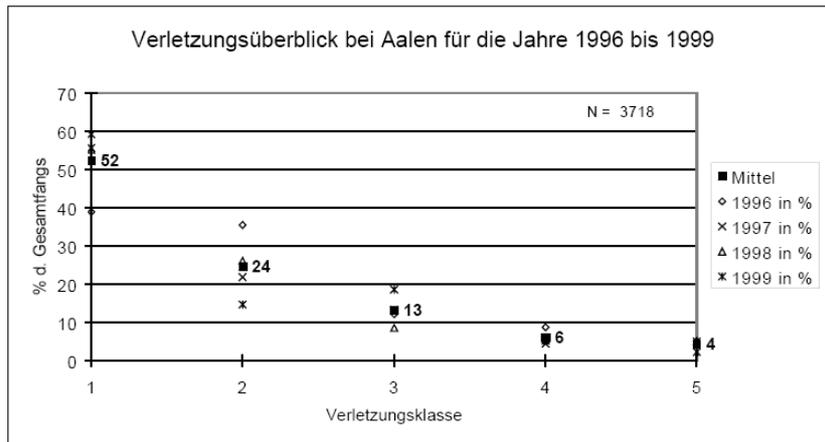


Figure 27 : Répartition (en %) des lésions entre les types de lésions 1 à 5 sur l'ensemble des anguilles capturées

Sur l'ensemble des anguilles étudiées, 23 % correspondaient aux classes de lésions 3 à 5. Il en a été déduit que les classes de lésions 4 et 5 sont généralement mortelles et que la mortalité consécutive aux lésions de la classe 3 est proche de 100 %. Les rares animaux de la classe 3 dont les lésions ont cicatrisé malgré tout sont si limités dans leur faculté de nager qu'ils ne peuvent certainement pas prendre part à effectuer leur migration de reproduction. Pour les animaux correspondant aux classes de lésions 1 et 2, il s'est avéré, après 3 semaines de captivité, qu'il existait toujours des individus présentant des fractures de la colonne et devant donc être affectés à la classe 3 (environ 5 %). On peut ainsi déduire de ces données qu'au moins 28 % des animaux ayant transité par la turbine ne peuvent participer à la survie de l'espèce (mort ou mobilité fortement réduite en raison des lésions interdisant toute migration).

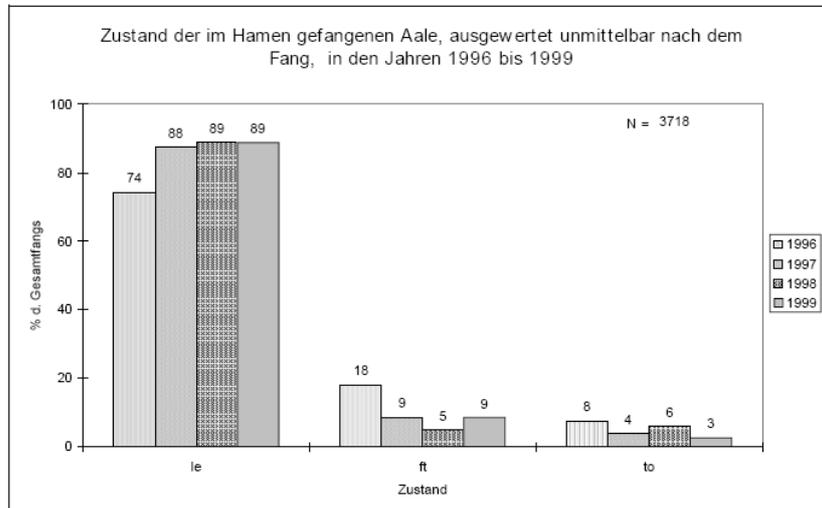


Figure 28 : Répartition des anguilles entre les classes «vivantes», «presque mortes» et «mortes» immédiatement après capture au filet sur toute la durée de l'étude (de 1996 à 1999).

En moyenne sur la durée de l'étude, 15 % des individus ont été classés comme morts (5 %) ou presque morts (10 %) immédiatement après leur capture. Les anguilles presque mortes pouvaient survivre plusieurs jours. Par ailleurs, 10 % des individus ne présentant que très peu de signes de lésions juste après leur capture (mouvements ralentis ou colorations) se sont avérés gravement blessés lors de leur maintien en captivité (8 %) ou de leur dissection (5 %).

Même si l'auteur ne précise pas dans le texte pour quelles ouvertures ont été effectués les pêches, l'examen des données brutes montre que la plupart des captures ont été effectuées à pleine ouverture ou ouverture importantes des turbines.

- **Données expérimentales sélectionnées pour la modélisation:**

num	SITE	CODE	P	H	NAP	Dr	N	U	esp	Q	Mort	TI	PO
67	Dettelbach	DETT2	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	12	0.3	≥70
68	Dettelbach	DETT3	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	10	0.4	≥70
69	Dettelbach	DETT4	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	19	0.5	≥70
70	Dettelbach	DETT5	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	25	0.6	≥70
71	Dettelbach	DETT6	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	47	0.7	≥70
72	Dettelbach	DETT7	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	53	0.8	≥70
73	Dettelbach	DETT8	2.5	4.65	4	3.54	100	18.5	2.78	65	60	0.9	≥70

□ RAYMONDVILLE

- **Référence :**

Franke G. F., Webb D. R., Fisher R. K., Mathur Jr. D., Hopping P. N., March P. A., Headrick M. R., Laczó I. T., Ventikos Y., Sotiropoulos F., 1997. Development of environmentally advanced hydropower turbine system design concepts. Idaho National Engineering Laboratory. INEEL-EXT-97-00639.

- **Localisation du site :**

Raymondville est une centrale hydroélectrique qui se situe au USA sur la rivière Raquette.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **6.6 m**. La turbine hélice testée a :

- une puissance nominale d'environ 2.4 MW,
- un débit maximal d'environ **46 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **120 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **3.33 m** et comporte **6 pales**. La vitesse périphérique est de l'ordre de 21 m/s.

- **Méthodes :**

Afin de capturer les poissons injectés, des filets ont été placés à l'aval des turbines.

- **Résultats :**

Sur 110 individus d'une longueur moyenne de **0.625 m**, 85% ont été récupérés. Le taux de mortalité a été estimé à **37%**.

□ KLEINWALLSTADT

- **Référence :**

Butschek V., Hofbauer J., 1956. Versuche über die Schädigung von Aalen durch Kaplan turbinen (Experiments on the injury of eels by Kaplan turbines). *Archiv für Fischereiwissenschaft*, 7(2): 178-184.

- **Localisation du site :**

Kleinwallstadt est une centrale hydroélectrique qui se situe au sur la Main en Allemagne.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

Cet aménagement est équipé de deux turbines Kaplan (verticale). La hauteur de chute est de **3.19 m**. La turbine testée a :

- une puissance nominale de 1.825 MW,
- un débit maximal d'environ **51 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **68 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **4.40 m** et comporte **4 pales**.

- **Méthodes :**

Les marquages sont des marquages externes par lots (fils de perlon colorés), les anguilles ont déversées à l'aval des grilles. La récupération a été effectuée par un pêcheur professionnel à l'aide d'un shokker équipé de deux dideaux. Les essais ont été effectués à pleine ouverture.

- **Résultats :**

Les taux de recapture sont de l'ordre de 50%. Le taux de mortalité sur les poissons recapturés sont de **14%** pour des anguilles dont la plupart faisaient entre 55 et 65 cm de longueur.

□ OBERNAU

- **Référence :**

Von Raben K., 1957a. Über Turbinen und ihre schädliche Wirkung auf Fische. Zeitschrift für Fischerei und deren Hilfswissenschaften (Sonderdruck), 6(Heft 1-8): 171-182.

Cité par KEMA (2003) et par Holzner (2000)

- **Localisation du site :**

Obernau est une centrale hydroélectrique qui se situe au sur le Main en Allemagne.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **2.98 m**. La turbine Kaplan testée a :

- une puissance nominale de 1.7 MW,
- un débit maximal d'environ **71 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **68 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **4.49 m** et comporte **4 pales**.

- **Méthodes :**

Cette information n'est pas donnée dans la bibliographie.

- **Résultats :**

Le taux de mortalité est de **20%** pour des anguilles de **0.55 m** de long en moyenne.

□ FRANKEL

- **Référence :**

Jørgensen L., Kroll L., Oberwahrenbrock G.K., 1999. Die Aalabwanderung an der Staustufe Fankel/Mosel. Auswertung des Fischereiversuchs vom 04.09.1993 bis 12.12.1993.

- **Localisation du site :**

Frankel est une centrale hydroélectrique qui se situe sur la partie allemande de la Moselle.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **6.04 m**. La turbine Kaplan testée a :

- une puissance nominale d'environ 4.7 MW,
- un débit maximal d'environ **100 m³/s**,
- une vitesse de rotation de **80 trs/min**.

La roue de cette turbine a un diamètre de **4.6 m** et comporte **4 pales**.

- **Méthodes :**

Opération de pêche à l'aide d'un dideau monté sur un shokker dans le canal de fuite de l'aménagement

- **Résultats :**

La mortalité moyenne, toutes tailles d'anguilles confondues, constatée lors des opérations de pêches a été estimée à 23%. Les opérations de pêche se sont déroulées pour des débits très variables. Le pourcentage de mortalité moyen de 23% associe donc des transits dans des turbines fonctionnant à pleine ouverture et à ouverture partielle. Lors du pic de migration (capture de 67% du total des captures sur la période de pêche de 100 jours), le taux de mortalité enregistré a été de 19%, les turbines fonctionnant très probablement à pleine ouverture, dans la mesure où le débit de la Moselle était alors largement supérieur au débit d'équipement de l'usine. On estimera la mortalité à pleine ouverture à une valeur de l'ordre de 19%.

□ SILKEBORG

- **Référence :**

Otterstrøm, C.V., 1936. Die Turbinen und die abwärtswandernden jungen Lachse und Forellen (sowie Aalen). 3.Teil. Journal du Conseil XI, pp. 72-93.

- **Localisation du site :**

Silkeborg est une centrale hydroélectrique qui se situe au Danemark.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La chute est de l'ordre de 2 m. La turbine Kaplan a un diamètre de **2.3 m** de diamètre, une vitesse de **107 trs/min**.

- **Méthodes :**

Cette information n'est pas donnée dans la bibliographie.

- **Résultats :**

Le taux de mortalité est de **57%** pour des anguilles de **0.35 à 0.61 m** de long.

Le taux de mortalité sur les anguilles recapturées dans le filet est de 33%, que ce soit sur des anguilles marquées ou des anguilles non marquées en dévalaison naturelle. Un taux d'échappement significatif sur les anguilles dans la nasse de recapture (36% des anguilles marquées recapturées) laisse à penser que ce taux est sur-estimés.

□ HOLSTEBRO

- **Référence :**

Otterstrøm, C.V., 1942. Turbines and descending salmon and trout smolt (and eels), part IV Rep. Dan. Biol. Stat. XLVII, pp. 27-37.

- **Localisation du site :**

Holstebro est une centrale hydroélectrique qui se situe au Danemark.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La turbine Kaplan à 4 pales, de diamètre **1.5 m**, sa vitesse de rotation est de **214 trs/min**, sa puissance est de 500 kw à pleine charge, la chute est de l'ordre de 4.00-4.30 m.

- **Méthodes :**

Les poissons étaient injectés près du distributeur à l'aide d'un tuyau et récupérés à l'aval dans un filet.

- **Résultats :**

Les pourcentages d'anguilles tuées étaient respectivement de 32% et 82% suivant que l'estimation se fait en fonction des nombres d'anguilles recapturées ou lâchées. Les dommages constatés sur les anguilles ont été tels que l'office de la pêche recommandait la capture systématique des anguilles argentées en amont de l'usine et leur transport à l'aval, alors que les dommages étaient considérés comme acceptables sur les smolts de saumons et de truite.

□ GUTTENBACH

- **Référence :**

Berg R.; 1994b. Untersuchungen mit Fischeinrichtungen am Kraftwerk Guttenbach. Fischereiforschungsstelle des Landes Baden –Württemberg; 25 p.

Cité par KEMA (2003)

- **Localisation du site :**

Guttenbach est une centrale hydroélectrique qui se situe en Allemagne sur la rivière Neckar.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

Cet aménagement est constituée d'au moins une turbine Kaplan bulbe (horizontale) avec une roue de **3.4 m** de diamètre. Elle fonctionne à une vitesse de **130 trs/min**.

- **Méthodes :**

Cette information n'est pas donnée dans la bibliographie.

- **Résultats :**

Le taux de mortalité est de **27.3%** pour des anguilles de **0.6 m** de long.

□ LETZTEN HELLER

- **Référence :**

Berg R., 1987b. Gutachtliche Stellungnahme zu Fischschäden durch den Betrieb der Wasserkraftanlage "Am Letzten Heller". Intern rapport Landesanstalt für Umweltschutz Baden – Württemberg; Institut für Seenforschung und Fischereiwesen: 47 p.

Cité par KEMA (2003)

- **Localisation du site :**

Cette centrale hydroélectrique se situe en Allemagne.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La turbine testée est une turbine « Straflo » de **2.4 m** de diamètre, de vitesse de rotation **142 trs/min**. Le débit maximal de la turbine est de **27 m³/s**.

- **Méthodes :**

Cette information n'est pas donnée dans la bibliographie.

- **Résultats :**

Le taux de mortalité est de **8.6%** pour des anguilles de **0.45 m** de long.

□ GEISLING

- **Référence :**

Seifert K., 1989. Schadensgutachten zu Aalschäden unterhalb des Donaukraftwerks Geisling.(non publié) 24 p.

Cité par Holzner (2000)

- **Localisation du site :**

Cette centrale hydroélectrique se situe sur le Danube en Allemagne.

- **Caractéristique de la turbine testée :**

La hauteur de chute est de **6.05 m**. Les turbines Kaplan sont des turbines de **5.35 m** de diamètre, à 4 pales, tournant à **78.95 trs/min**.

- **Méthodes :**

Observations effectuées par des pêcheurs professionnels capturant les anguilles à l'aval de la centrale dans des dideaux équipant des shokkers.

- **Résultats :**

Le taux de mortalité observé est de **42 à 50%**. Un lien très net a été établi entre l'ouverture de la turbine et le pourcentage de dommages : les taux de blessure étaient inversement proportionnels au degré d'ouverture de la turbine. Le pourcentage d'anguilles sectionnées augmentait avec la longueur des poissons. Mais par contre les ruptures de la colonne étaient proportionnellement plus fréquentes chez les anguilles les plus petites. L'auteur a fait l'hypothèse que les grands individus résistaient mieux aux impacts que les petits. L'efficacité des captures par skokker n'est cependant pas connue et ce pourcentage est sans doute surestimé.