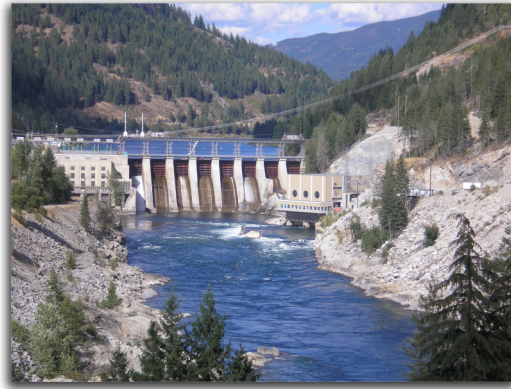


ENR811 Hydraulique et hydroélectricité - Les enjeux du développement durable

© Michel Sabourin 2021

6 juillet 2021

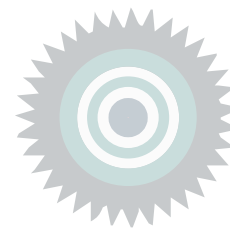


ENR811 Énergie hydraulique

Table des matières

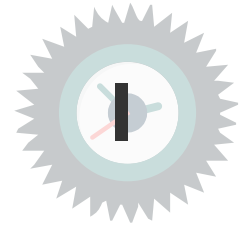
Objectifs	3
I - Hydraulique et hydroélectricité - Les enjeux du développement durable	4
1. Efficacité énergétique et environnementale	4
2. Le taux de retour énergétique	6
3. La production de gaz à effet de serre.....	8
4. Dangers et risques comparés des sources d'énergies.....	11
5. Emprises sur la biosphère	13
6. Consommation de matériaux	20
II - Exercice : Exercices	22
Solutions des exercices	24
Glossaire	26
Bibliographie	27
Webographie	28
Index	29
Crédits des ressources	30
Contenus annexes	36

Objectifs



- Connaître les différents facteurs mesurables qui influencent le développement durable des sources d'énergie.
- Connaître les avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie et en particulier de l'énergie hydraulique.

Hydraulique et hydroélectricité - Les enjeux du développement durable



Toute activité humaine perturbe l'environnement et donc la mise en place de moyens de production d'énergie n'y échappe pas.

La consommation d'énergie a des exigences très sévères et requiert des moyens de production en adéquation. Il faut pouvoir en disposer en qualité, en quantité et au moment choisi tout en payant le minimum. La panne ou la pénurie d'énergie sont dans nos sociétés complètement inacceptables. La production et le stockage d'énergie doivent donc répondre à ces critères.

Résultant d'un choix de moyen, l'hydroélectricité est en compétition et est comme toute source d'énergie le résultat d'une mise-en-œuvre et d'une production qui fait appel à différentes ressources en les consommant, les détruisant ou les altérant.

Il convient donc de mesurer et de pondérer ces ressources pour faire un choix éclairé.

La production d'énergie en général a un **coût environnemental et social** qu'on peut comptabiliser en mesurant et pondérant les besoins en ressources suivantes :

- Pour sa construction et sa mise en oeuvre :
 - l'énergie qu'on doit dépenser pour sa construction et sa mise-en-œuvre ,
 - des matériaux pour la construction,
 - le temps soit le délai entre la décision de procéder au projet de développement et la mise en exploitation commerciale,
 - des vies humaines : des blessures, mortalité, accidents.
- Pour sa durée de vie utile :
 - de matériaux, carburants et autres ressources,
 - des fluides environnementaux, l'air, l'eau qui sont pollués, altérés et rendus moins accessibles en qualité et quantité pour la faune ou la flore,
 - de l'espace en volume et en surface qui est occupé partiellement ou en totalité par le moyen de production et de stockage,
 - de coûts de maintenance.

Dans le développement et l'exploitation d'un projet énergétique, l'ingénieur doit maximiser la qualité et la quantité de la production en minimisant les coûts sociaux, financiers et environnementaux.

1. Efficacité énergétique et environnementale

L'efficacité énergétique exprime la proportion entre l'énergie produite et l'énergie brute disponible.

C'est une variable importante à optimiser. En général, une installation de production a plusieurs aspects de son empreinte écologique qui sont indépendants de son efficacité. On pense à :

- l'énergie qu'on doit dépenser pour sa construction et sa mise-en-œuvre ,

- des matériaux pour la construction, carburants et autres ressources,
- le temps soit le délai entre la décision de procéder au projet de développement et la mise en exploitation commerciale,
- des vies humaines : des blessures, mortalité, accidents,
- de coûts de maintenance.

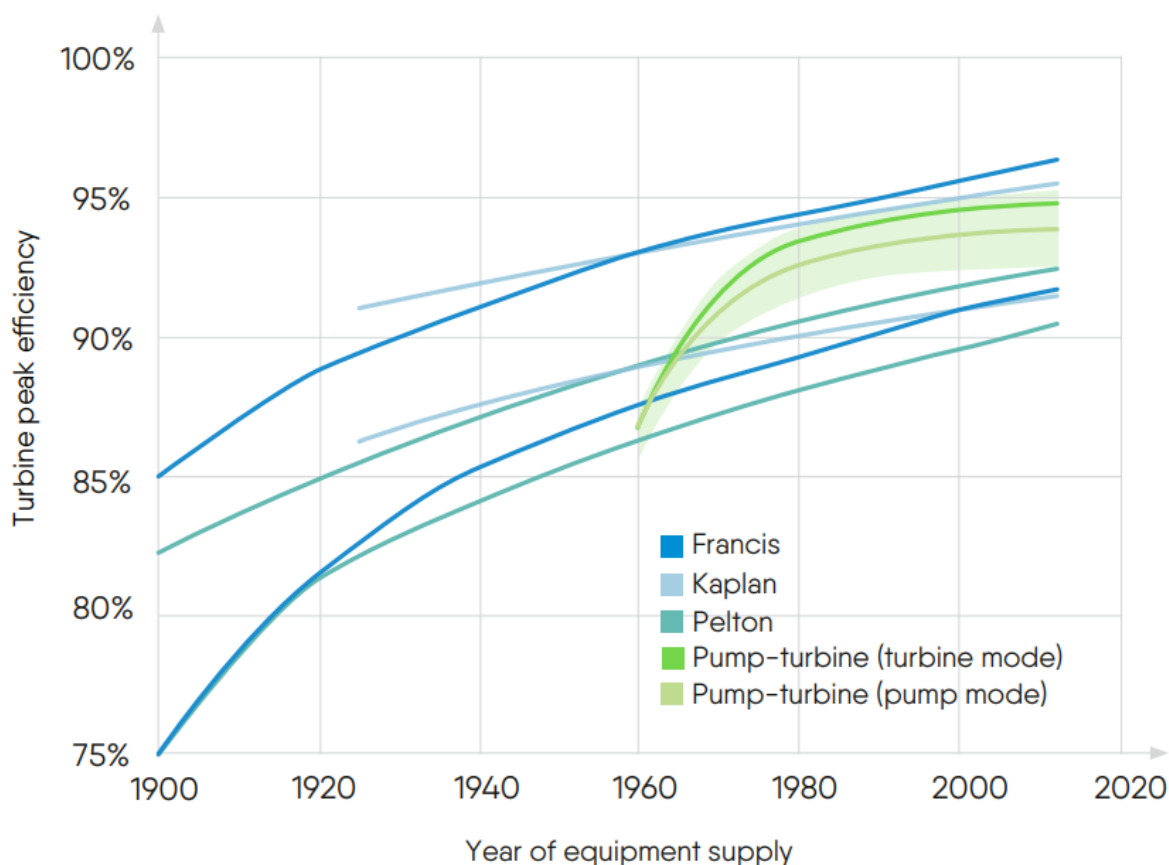
Il devient donc très intéressant d'en maximiser l'efficacité. On obtient ainsi plus d'énergie sans accroître les méfaits sur l'environnement.

L'hydroélectricité dans ce domaine est très favorisée :

- Les turbines hydrauliques sont exploitées dans une gamme de puissance où leur rendement est généralement au dessus de 90%.
- Les alternateurs hydrauliques présentent des rendements supérieurs à 98%.
- S'ajoute les pertes de transformation, transmission et distribution, ces pertes pour les lignes longues distances et la transformation à très haute tension sont d'environ 5% ^{T&D losses in USA p.28}.

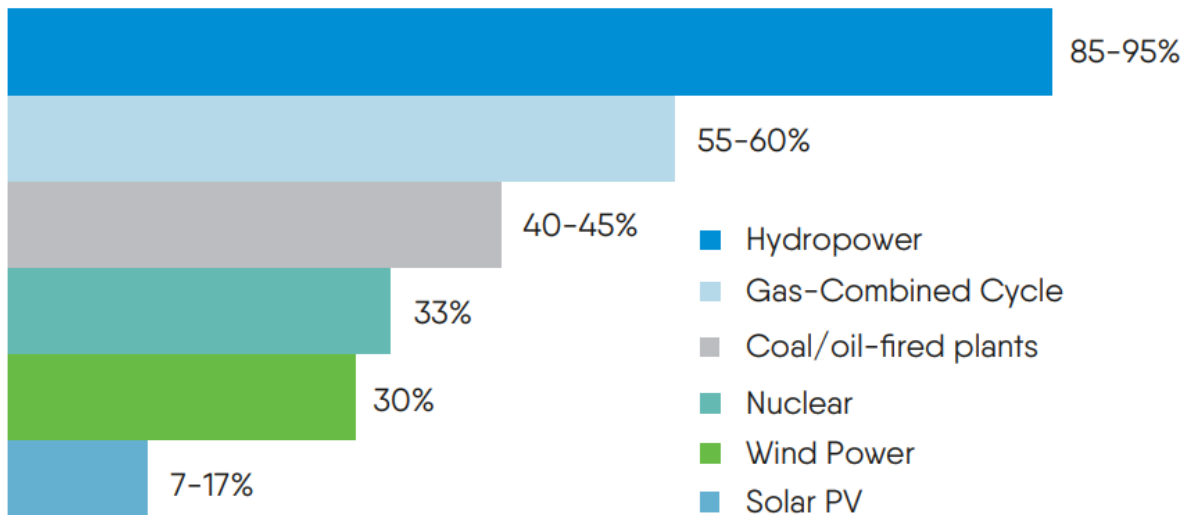
En hydraulique, la recherche et le développement est continu mais surtout chaque site est optimisé.

Dans le graphique suivant on montre l'évolution de l'efficacité des turbines au fil du temps. L'avènement des solutions numériques pour la conception et la fabrication explique en grande partie cette croissance des performances. Certaines solutions sont présentées *ici* ^(cf. p.36).



Évolution dans le temps des rendements des turbines hydrauliques

En définitive, quand on compare aux autres sources d'énergie, l'avantage de l'hydroélectricité est frappant.



Efficacité des différentes sources d'énergie

2. Le taux de retour énergétique

La mise en œuvre d'un projet énergétique et son exploitation consomme de l'énergie. Pendant le cycle de vie prévue, la production énergétique du projet doit y être supérieure à l'énergie consommée pour le mettre en œuvre. Ainsi cette contribution positive permet au projet d'être considéré comme une source d'énergie.



Définition

Le *taux de retour énergétique* ^{Wikipedia - Taux de retour énergétique p.28} (TRE) exprime cet aspect de l'efficacité d'une source d'énergie. Il s'agit de considérer l'énergie pour construire et maintenir un système de production par rapport à sa production prévue durant sa vie utile.

TRE = Énergie livrée / Énergie dépensée

Energy Return on Energy Invested (EROEI) = Taux de retour énergétique (TRE)

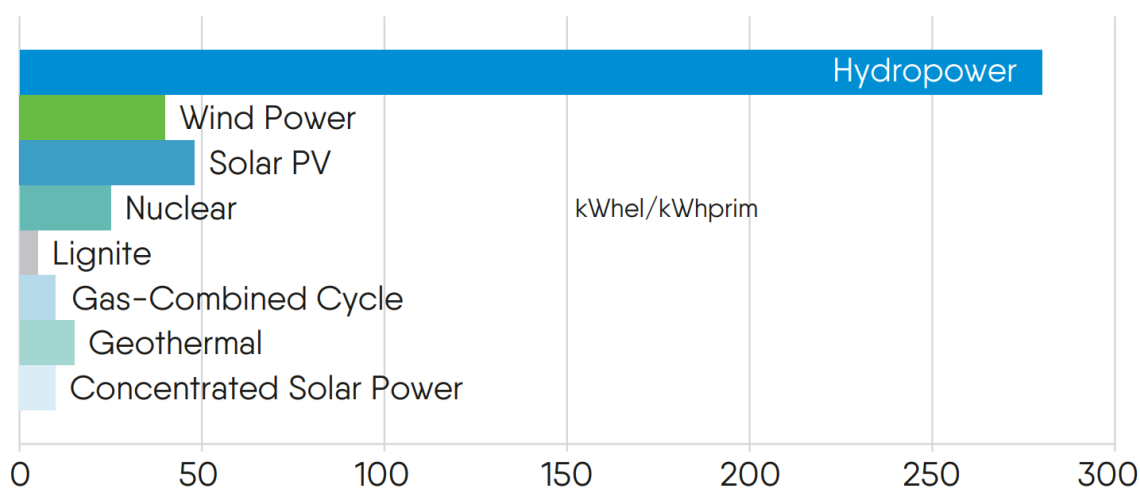


Fondamental

Les différentes études disponibles convergent pour annoncer pour l'hydroélectricité un TRE supérieur aux autres sources d'énergie. Même si certaines études sont plus pessimistes, Hydro-Québec pour ses installations avance un chiffre au delà de 250. Il reste qu'il y a consensus pour considérer l'hydroélectricité plus efficace sur cet aspect que tout autre source d'énergie.

Sources d'énergie	TRE Cleveland ²	TRE Elliott ³	TRE Hore-Lacy ⁴	TRE (Autres)
Combustibles fossiles				
Pétrole				
- Jusqu'à 1940	> 100	50 - 100		5 - 15 ⁵
- Jusqu'à 1970	23			
- Aujourd'hui	8			
Charbon				
- Jusqu'à 1950	80	2 - 7	7 - 17	
- Jusqu'à 1970	30			
Gaz naturel	1 - 5		5 - 6	
Schistes bitumineux	0,7 - 13,3			< 1
Energie nucléaire				
Uranium 235	5 - 100	5 - 100	10 - 60	< 1 ⁶
Fusion nucléaire				< 1
Energies renouvelables				
Biomasse		3 - 5	5 - 27	
Énergie hydroélectrique	11,2	50 - 250	50 - 200	
Énergie éolienne		5 - 80	20	
Géothermie	1,9 - 13			
Energie solaire				
- Énergie solaire thermique	4,2	3 - 9	4 - 9	7 - 20 ⁷
- Énergie solaire photovoltaïque	1,7 - 10			
Ethanol				
- De canne à sucre	0,8 - 1,7			0,6 - 1,2
- De maïs	1,3			
- De résidus de maïs	0,7 - 1,8			
Methanol (de bois)	2,6			

Le Taux de Retour Énergétique selon certaines sources citées par Wikipédia



Taux de retour énergétique comparés selon Hydro-Québec

En hydroélectricité, les installations de turbinage-pompage, avec une efficacité globale au dessus de 80% pour le cycle complet, consomment plus qu'ils ne produisent. Ils ne sont pas comme telle des sources d'énergie, leur TRE est inférieur à 1. Malgré cette état de fait, leur utilisation permet un fonctionnement du réseau plus en accord avec la demande en absorbant les surplus d'énergie et en les restituant lors des pointes de demande. Elles sont donc extrêmement utiles et de plus en plus importantes à se raccorder au réseau. Il est vrai que souvent, des adductions au réservoir amont doivent être turbinées et ainsi augmentent la capacité de production par rapport au pompage. L'installation remarquable de Grand-Maison près de Grenoble en France en est un bel exemple, on y trouve 8 turbines-pompes et 4 turbines, chacune de 150MW. Voir ses caractéristiques sur Wikipédia ici¹.



Vue sur le réservoir amont de Grand Maison situé à plus de 900 m au dessus du réservoir aval

 **Complément**

Sur son concurrent le plus proche, l'hydroélectricité a un avantage significatif sur le retour énergétique.

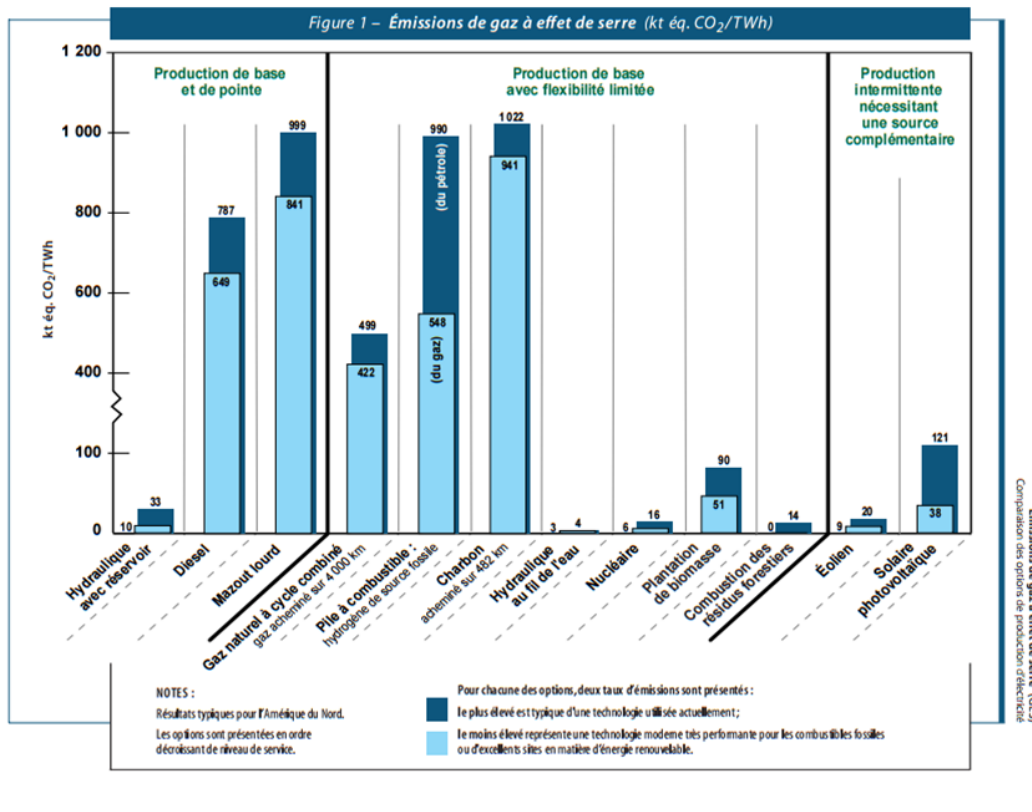
Quand le TRE d'une ressource est inférieur ou égal à 1, cette source d'énergie devient un « puits d'énergie », et ne peut plus être considérée comme une source d'énergie primaire.

3. La production de gaz à effet de serre

GES comparaison avec les autres sources d'énergie

« Toutes les filières de production d'électricité produisent des gaz à effet de serre (GES) au cours de leur cycle de vie (construction, exploitation et déclassément). L'hydroélectricité produit surtout du dioxyde de carbone et, dans une moindre mesure, du méthane, résultat de la dégradation de la matière organique ennoyée. Sur l'ensemble du cycle de vie, les émissions nettes de GES des centrales hydroélectriques québécoises sont similaires à celles des éoliennes, et sont beaucoup plus faibles que celles des centrales au gaz naturel ou au charbon. » CIRAIG (2014) p.27

¹https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_de_Grand%27Maison



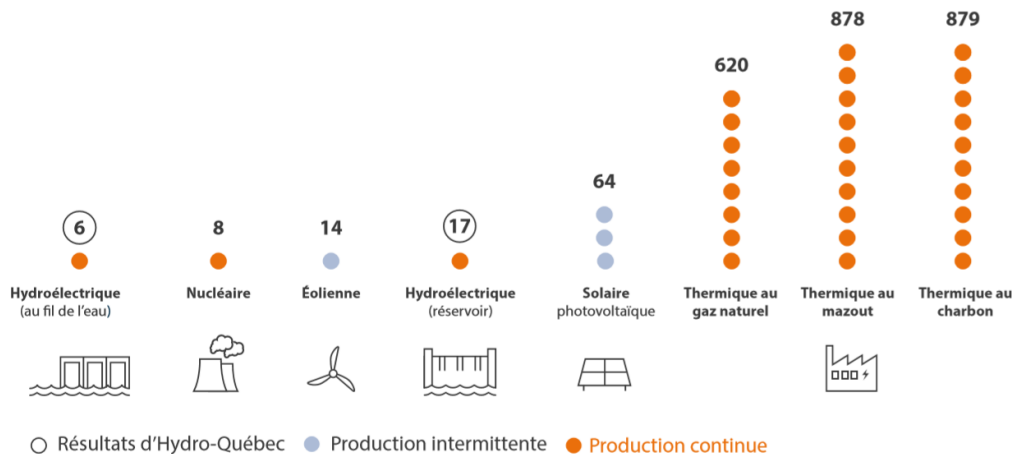
Comparaison en production de GES des options de production d'électricité suivant les scénarios minimum et maximum

La production des Gaz à Effet de Serre^{p.28} est une préoccupation environnementale très connue. Encore sur ce point, l'hydroélectricité se démarque sur les autres moyens de production.

On remarquera sur le graphique suivant qu'on a différencié des contributions aux GES pour les centrales hydroélectrique avec réservoir et au fil de l'eau. En effet, c'est le réservoir amont qui, en noyant les terres lors de son remplissage est responsable de la plus haute production de GES. Par contre, ce réservoir donne beaucoup de flexibilité à la gestion du réseau en permettant de faire fluctuer la production pour suivre la demande. De leur côté, les centrales au fil de l'eau n'inondent presque pas les abords de la rivière et de ce fait ne produisent que très peu de GES. Ces centrales doivent fonctionner en accord, non pas avec la demande du réseau, mais plutôt avec le débit saisonnier de la rivière.

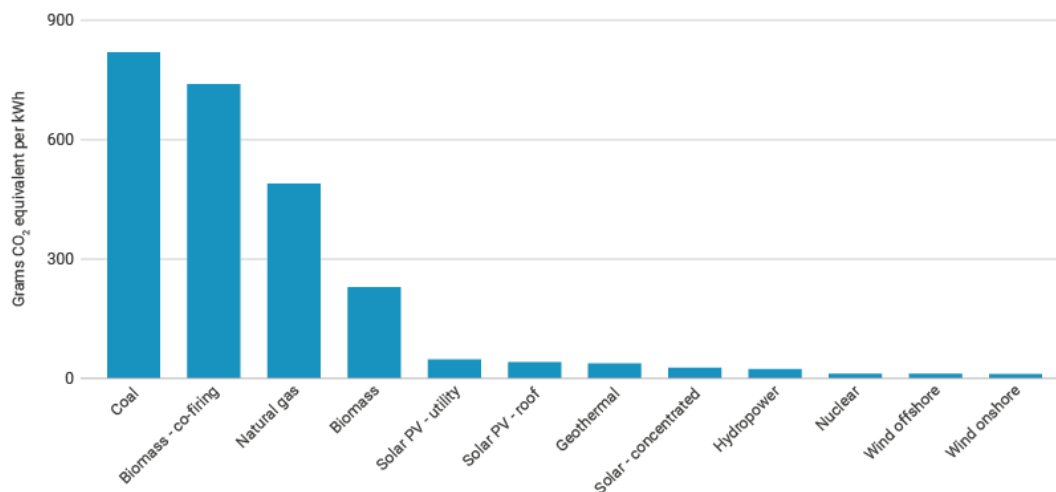
ÉMISSIONS DE GES

Émissions en g eq. CO₂*/kWh des différentes filières



Comparaison des émissions en GES de différentes filières énergétiques

Voici une autre source d'information confirmant les différentes émissions de GES selon le type d'énergie.

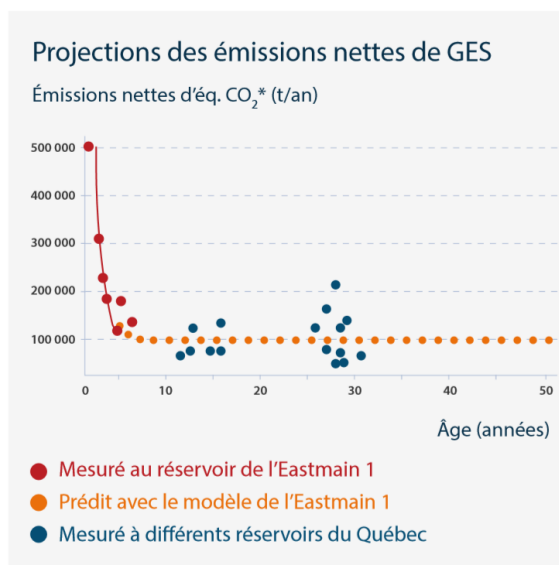


Équivalent en CO₂ pour un cycle de vie moyen

En terme de GES, la plus grande préoccupation reste les émissions dans les réservoirs. Il faut quand même noter que les quantités comparés sont faibles et qu'en plus elles sont temporaires.

Émissions temporaires

Hydro-Québec a été une pionnière de l'étude des GES émis par les réservoirs hydroélectriques. Nos études réalisées à ce jour démontrent que les émissions atteignent un sommet rapidement après la mise en eau, pour **revenir après cinq à dix ans à des émissions similaires à celles des lacs naturels**².



Projection des émissions nettes de GES par Hydro-Québec



Attention

Il faut noter que la contribution aux GES des systèmes hydroélectriques durant la production, ne se fait pas à partir de carbone fossile ; il s'agit, en fait, de l'émission de dioxyde de carbone et de méthane produit par la décomposition de matière organique dans les réservoirs. C'est un phénomène qui est temporaire et qui s'estompe dans le temps pour revenir aux émissions qu'on retrouve dans les lacs naturels.

C'est lors de la construction qu'il y a production de GES à partir du carbone fossile, mais c'est relativement peu quand on se réfère au TRE, le taux de retour énergétique.

Puisque qu'en période de production, on ne réintroduit pas plus de carbone fossile dans la chaîne biologique, l'hydroélectricité est une source d'énergie très respectueuse du cycle du carbone dans la chaîne biologique actuelle.

4. Dangers et risques comparés des sources d'énergies

On entend souvent dire que :

« *Vivre n'est certes pas une entreprise sans risque* »

Ou que

« *Toute activité présente un danger* »

Il est vrai que pour le scientifique l'absolu n'existe pas et qu'il est impossible d'éliminer tous les danger et les risques. Toutefois, on peut les gérer de façon optimale.

Pour appréhender ces concepts, voyons d'abord comment ils se définissent.

Danger et risque



Un **danger** est une propriété ou une capacité inhérente à une situation, un équipement. Le danger existe en soi et on doit vivre avec.

Le **risque**, c'est l'événement néfaste de l'exposition à un danger. Le risque est donc à minimiser, à gérer. Ici, l'**exposition** est une notion de probabilité.

On peut donc formuler ainsi ces définitions en équation :

$$\text{Risque} = \text{Danger} * \text{Exposition}$$

En pratique, si on fait l'hypothèse que le passé est garant de l'avenir, on peut évaluer l'exposition à partir des dommages passés, cumulés et rapportés au temps ou autre mesure physique. À cet égard, les statistiques nous permettent d'appréhender le risque qui est le résultat qui nous intéresse.

Le dommage est la conséquence inévitable du risque.

L'ingénieur n'a de contrôle que sur l'exposition et dans le domaine de l'énergie on peut constater que les risques sont assez différenciés.

Le taux de mortalité



Dans l'optique d'un développement durable, la mortalité est certainement le dommage le plus important à considérer comme en fait foi la disponibilité des informations sur le sujet. Alors que les données sur les dommages matériels sont beaucoup plus difficiles à obtenir.

Beaucoup d'études régionales puis mondiales permettent d'avoir une très bonne perception du taux de mortalité que représentent les différentes sources d'énergie.

Nils Starfelt et Carl-Erik Wikdahl présentent dans leur article *Economic Analysis of Various Options of Electricity Generation - Taking into Account Health and Environmental Effects*¹ les justifications pour exprimer le taux de mortalité en morts par TWh.

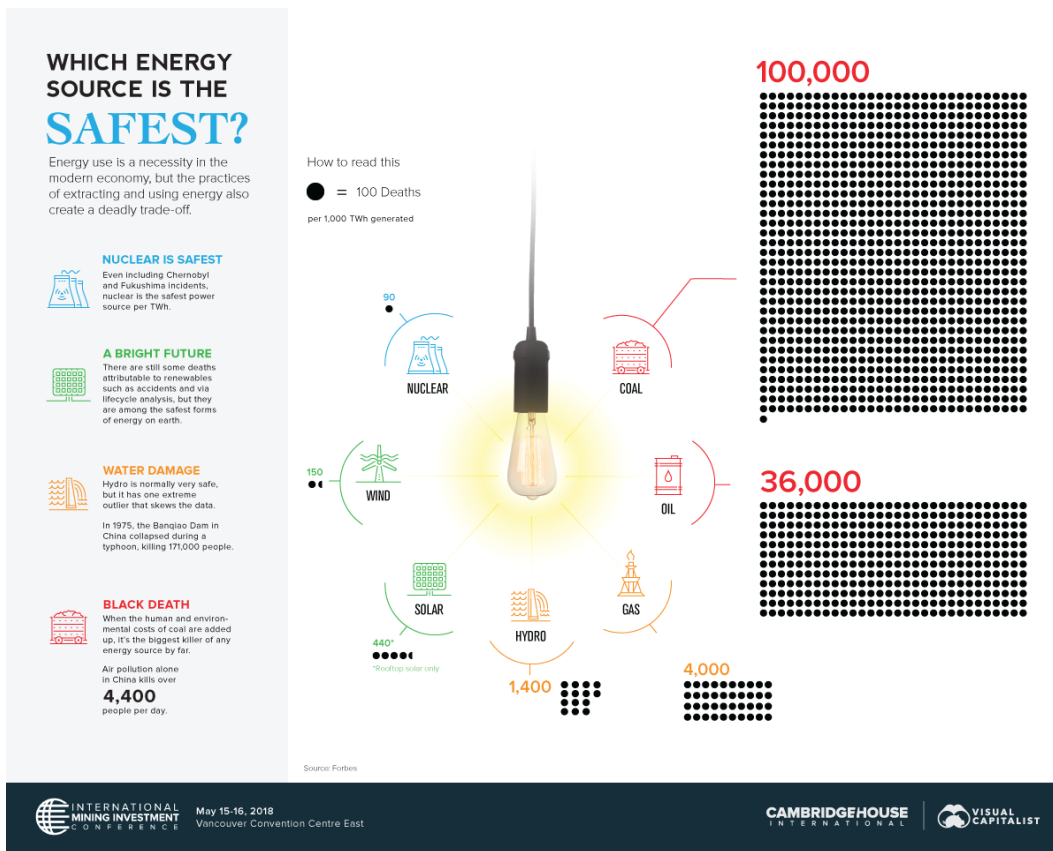
¹ <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.180.4490>

Dans le tableau suivant publié en 2012, on affiche ces résultats :

Energy Source	Death Rate (deaths per TWh)	
Coal (elect, heat, cook –world avg)	100	(26% of world energy, 50% of electricity)
Coal electricity – world avg	60	(26% of world energy, 50% of electricity)
Coal (elect,heat,cook)– China	170	
Coal electricity- China	90	
Coal – USA	15	
Oil	36	(36% of world energy)
Natural Gas	4	(21% of world energy)
Biofuel/Biomass	12	
Peat	12	
Solar (rooftop)	0,44	(0.2% of world energy for all solar)
Wind	0,15	(1.6% of world energy)
Hydro	0,1	(europe death rate, 2.2% of world energy)
Hydro - world including Banqiao)	1,4	(about 2500 TWh/yr and 171,000 Banqiao dead)
Nuclear	0,04	(5.9% of world energy)

Taux de mortalité par source d'énergie

À partir de données similaires, le graphique suivant est publié en 2018.



La source d'énergie la plus sûre vous surprendra

On y constate qu'aucune source d'énergie n'est parfaitement sûre. Toutefois, on remarque qu'il y deux ordres de magnitude entre les résultats des énergies fossiles et les autres.

L'hydroélectricité se trouve dans une position enviable. À ce sujet, on notera que les statisticiens ont observé une donnée aberrante que représente la rupture du barrage de Banqiao en 1975. Ainsi, si on ne tient pas compte de cet événement le taux de mortalité pour l'hydroélectricité passe de 1,4 à 0,1 par TWh. Ce barrage avait été construit en 1959 pour contrôler les inondations, il a été détruit pendant la révolution culturelle chinoise et je n'ai trouvé aucune référence à une centrale hydroélectrique qui s'y trouvait. On observera aussi qu'en Chine, les statistiques de mortalité sont pires qu'ailleurs peu importe la source d'énergie.

Sans l'événement de Banqiao, l'hydroélectricité présente moins de risque que toutes les sources d'énergie renouvelable et serait un million de fois moins risquée que le charbon.

On trouve sur Wikipédia une liste exhaustive des ruptures de barrage¹, qui constituent le type d'événement le plus dangereux en hydroélectricité. La rupture du barrage de Banqiao² y est aussi présenté.

5. Emprises sur la biosphère

L'exploitation d'une source d'énergie nécessite de l'espace qui devient moins disponible, à divers degré, à d'autres utilisations, à la faune et à la flore.

On peut penser :

- Aux surfaces de terrains occupées
- Aux fluides environnementaux, l'air, l'eau qui sont pollués, altérés

Ces éléments sont donc rendus moins accessibles en qualité et quantité pour la faune ou la flore y compris nous les humains.

Il convient donc d'évaluer ces impacts et de les pondérer en importance.

Cette analyse est faite qualitativement ce qui permettra quand même d'apprécier les différences les plus criantes entre les différentes sources d'énergie.

L'occupation des surfaces



Sur cet aspect, l'hydroélectricité est très gourmande. En effet, en plus des installations construites comme les centrales, barrages, digues, et autres emprises, s'ajoute pour les centrales à réservoir, des kilomètres carrés de terres inondées. En plus, une parties encore plus importantes du territoires est asservi de façon hydrologique, sans aucune altération, pour recueillir l'eau et alimenter par les voies naturelles préexistantes ces réservoirs. Donc, l'aménagement du territoire par l'hydroélectricité peu en fait couvrir un pays entier.

Il devient donc évident que l'appréciation du tort soit faite pour établir des comparaisons.

Il y deux notions à tenir en compte :

- la qualité écologique de l'espace occupé.
- le degré de partage de cet espace avec la faune, la flore ou tout autre utilisation sociale.

Dans un premier temps, il faut apprécier l'importance écologique de l'espace occupé. Par exemple, la centrale Robert-Bourassa est creusée sous la montagne et donc le volume occupé a peu de qualité pour la faune, la flore ou tout autre utilisation, si ce n'est de l'évacuation des déblais qui doivent être relocalisés dans le voisinage. Par contre, le barrage lui-même, le déversoir, les carrières qui ont été exploitées pour les construire ont modifié de façon importante des surfaces de terrain de très bonne qualité et laissent peu de partage avec la faune et la flore. On peut imaginer que les terrains occupés par les centrales thermiques sont aussi d'utilisation assez exclusive.

Dans l'illustration suivante, on saisi l'envergure des emprises de l'évacuateur de crue et du barrage principal à LG2. Ce barrage retient une chute de presque 140 m.

¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Rupture_de_barrage

² https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_de_Banqiao



L'aménagement de LG2 comporte un déversoir et deux centrales (Robert-Bourrassa et La Grande-2-A) pour une capacité de 7722 MW.

Pour l'hydroélectricité, l'empiétement sur le territoire ne s'arrête évidemment pas là. Les réservoirs créés ont inondé des kilomètres carrés de terres de très bonne qualité écologique. Ces surfaces soutirés aux espèces terrestres deviennent disponibles aux espèces aquatiques ce qui perturbe de façon significative mais temporaire la faune et la flore. Mais le fait de passer d'une rivière à un lac modifie considérablement l'habitat.

Sur la vue satellitaire suivante qui reste partielle, on voit comment un aménagement hydroélectrique peut modifier un vaste territoire. On y voit cerclé les réservoirs créés pour entreposer l'énergie hydraulique. Il faut observer qu'en dehors des zones inondées ou affectées par la montée des eaux, le réseau hydrologique, en soi, n'est pas affecté.



Les réservoirs créés par le projet de la Baie James couvrent un territoire qui se mesure en centaines de kilomètres

La production d'énergie occupe des zones qui en rapport aux autres activités écologiques peut être :

- En complète exclusion
- En partage
- Sans aucune nuisance

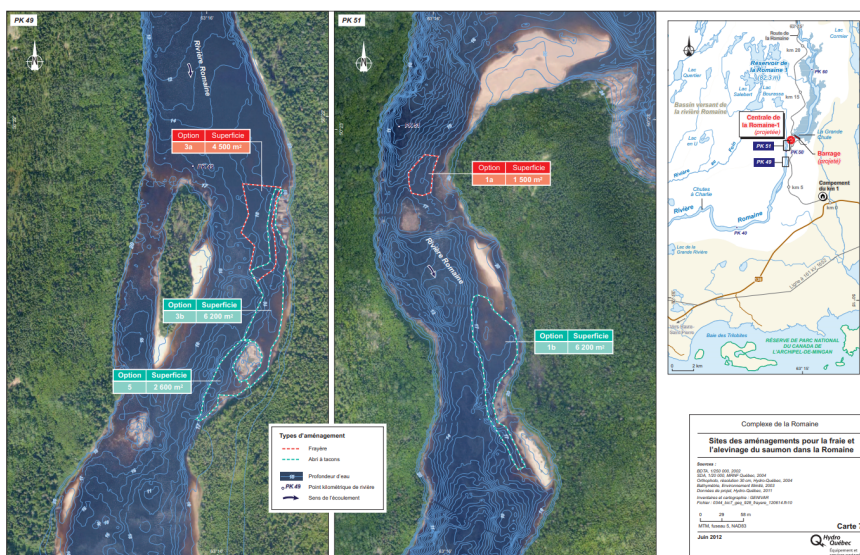
Il existe que plusieurs solutions de mitigation existent et sont mises en place.

De façon non exhaustive, on peut citer en exemple des :

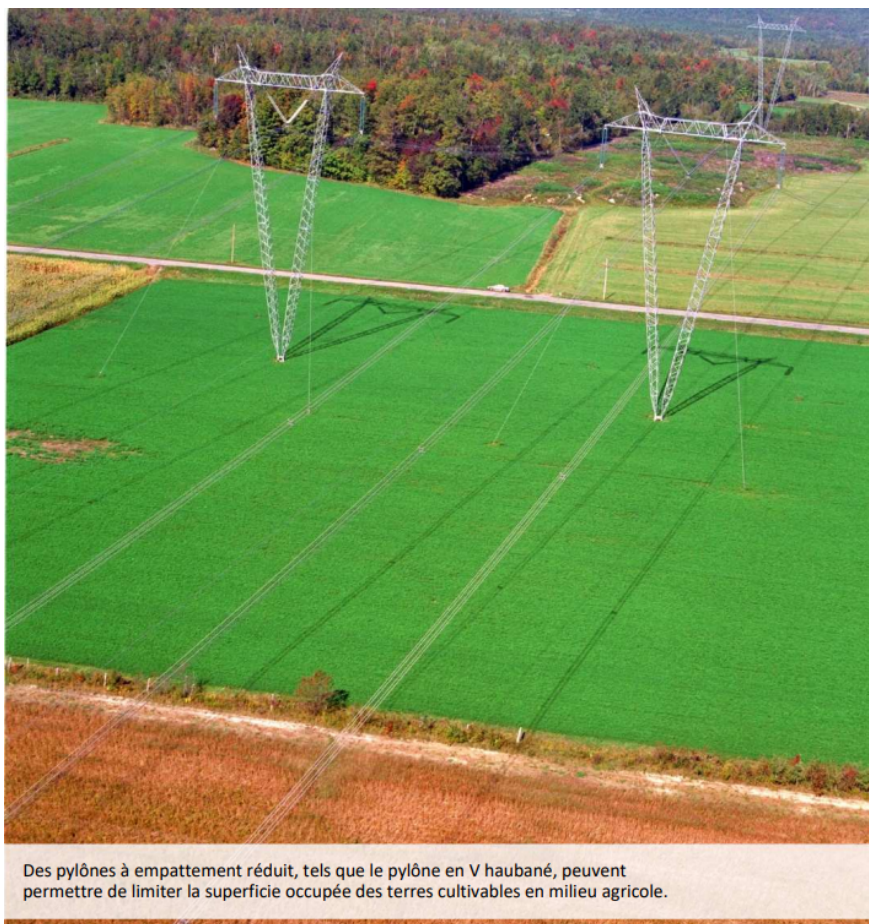
- plantations pour restaurer les surfaces mises à nu.
- aménagements de frayères pour faciliter la transition entre les milieux aquatiques passés et nouveaux.
- optimisations des espaces occupés



Étude détaillée des effets des mesures de mitigation



Aménagements de frayères



Des pylônes à empattement réduit, tels que le pylône en V haubané, peuvent permettre de limiter la superficie occupée des terres cultivables en milieu agricole.

Partage de l'espace

L'altération des fluides air et eau

La production d'énergie peut affecter de façon considérable l'atmosphère en particulier en produisant des GES^{p.26}. Ce sujet est traité dans la section *Émission des gaz à effet de serre* (cf. p.8).

Pour ce qui est de l'eau, pour la production hydroélectrique, les quantités affectées sont considérables puisqu'elles comprennent toutes celles comprises dans le réseau hydrographique qui est harnaché.

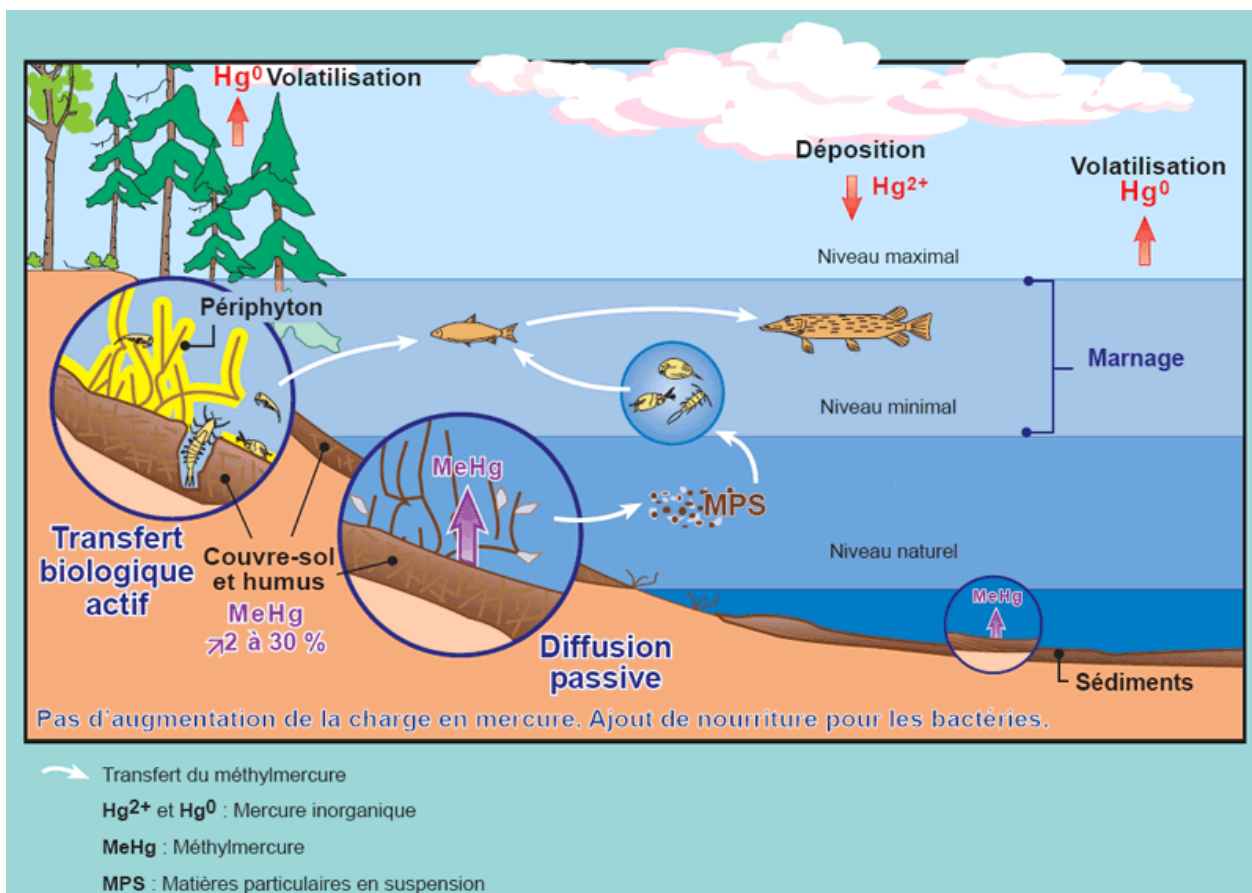
Cette eau est affectée de différentes façons :

- par la pollution chimique
- par le déséquilibre dans son interaction avec l'air de l'atmosphère
- par la perturbation de son écoulement

La pollution chimique de l'eau la plus significative est celle due au **mercure**.

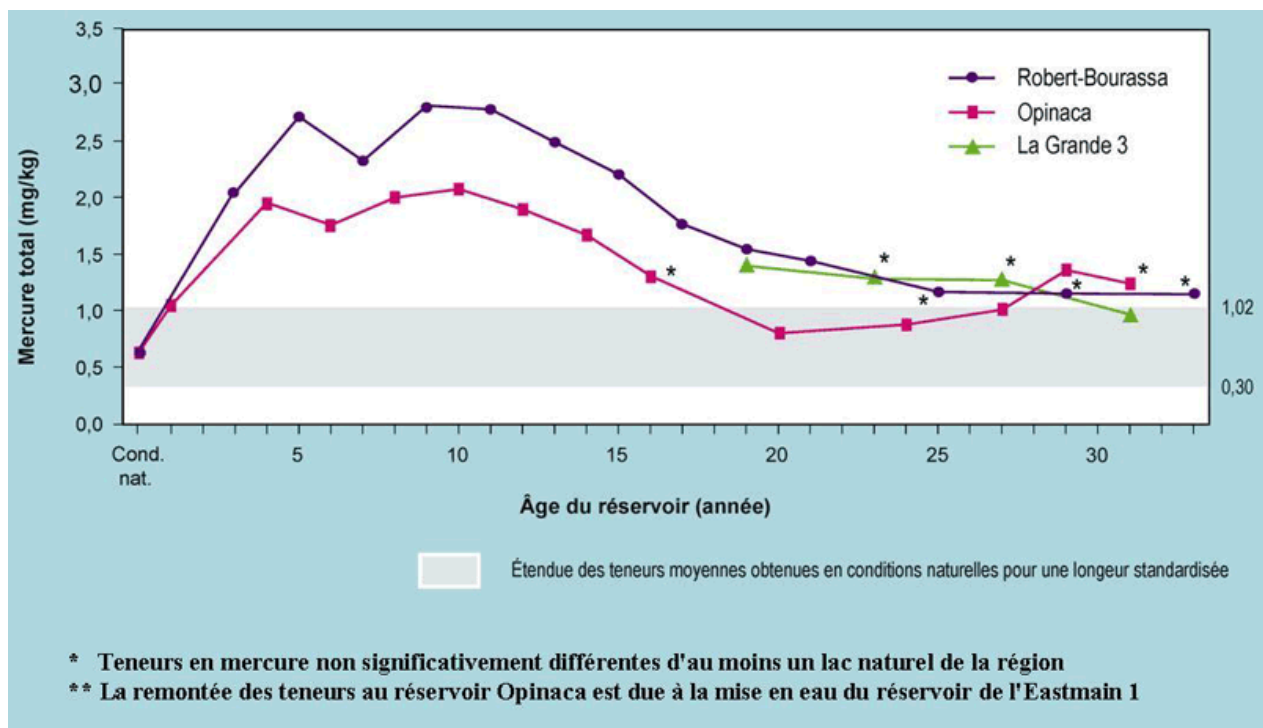
Le mercure est émis dans l'air de façon naturelle par les volcans et les feux de forêt ou engendré par des activités humaines, comme la combustion du charbon et le brûlage des déchets. Il est transporté dans l'atmosphère sur de longues distances, puis il tombe dans les lacs et les forêts avec les poussières et la pluie.

Lors de la mise en eau d'un nouveau réservoir, le mercure inorganique accumulé sur les terres est subitement transformé par les bactéries en une forme qui est facilement assimilée par les organismes vivants. Cette forme de mercure (le méthylmercure) peut devenir toxique à de fortes concentrations. Le mercure s'accumule pendant toute la vie des poissons de sorte que les plus vieux et les plus gros ont un taux plus élevé de mercure.



Cheminement du mercure peu après la mise en eau des réservoirs

L'eau ne présente pas de danger de toxicité si on la boit. Par contre, les poissons prédateurs en ont des concentrations élevées et leur consommation humaine est dangereuse. La teneur moyenne en mercure des poissons a augmenté d'un facteur variant de 2 à 8, selon les espèces et les réservoirs.



Évolution de la teneur en mercure des dorés jaunes

On observe que le mercure est un problème transitoire dû à l'inondation subite des terres sous le nouveau réservoir. Après quelques dizaines d'années, les niveaux de contaminants rejoignent les niveaux naturels normalement observés.

Une autre source de pollution est celle due à l'utilisation des **lubrifiants minéraux** pour les équipements des centrales. C'est un phénomène accidentel de plus en plus maîtrisé et assez restreint. On se référera à la section sur les *solutions environnementales* (cf. p.41) pour les turbines.

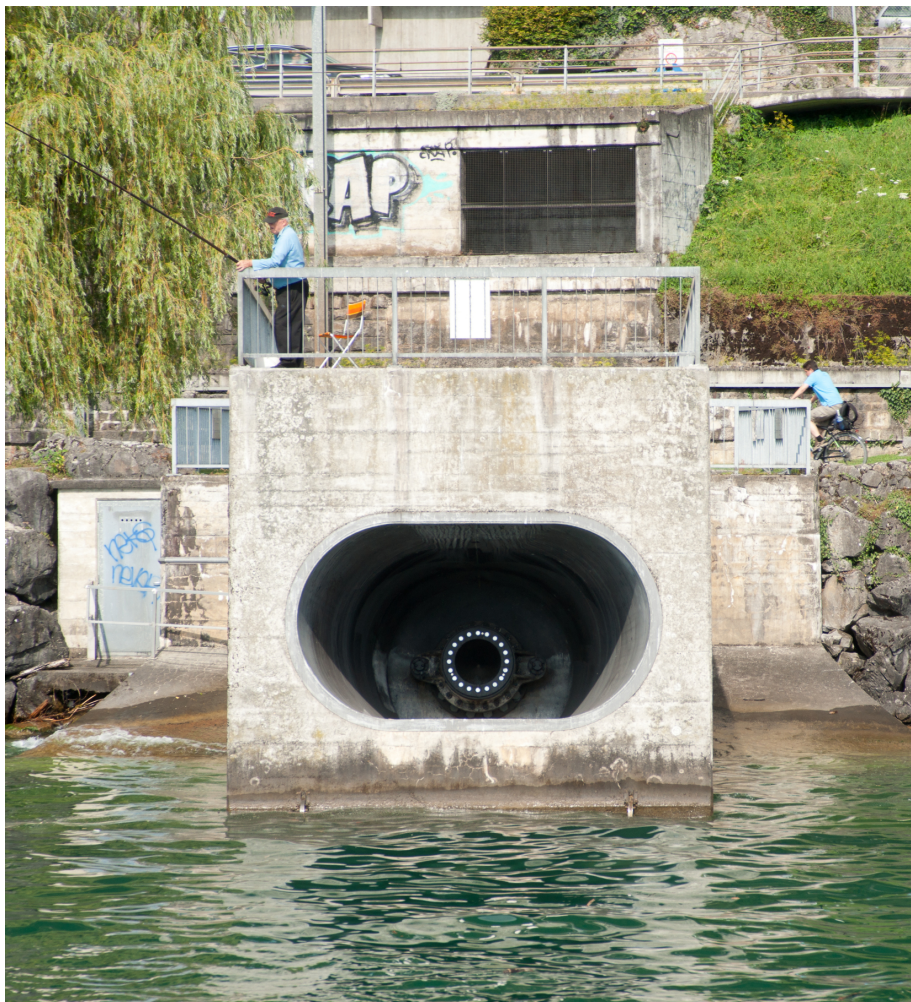
La **modification des écoulements** par l'installation de digues et barrages ou l'utilisation des déversoirs a des conséquences sur la qualité de l'eau.

Les cascades naturelles sont souvent complètement submergées et ne contribuent plus à l'oxygénation de l'eau. Cet effet a des répercussions importantes dans les zones climatiques chaudes, le réservoir vient à manquer d'**oxygène dissout** surtout en profondeur. Si cet eau est captée par la turbine et envoyée dans la rivière à l'aval, elle tue toute vie aquatique. C'est un phénomène très étudié et on a appris à y remédier en utilisant les turbines pour introduire de l'air dans l'eau. Cette solution est présentée *ici* (cf. p.44).

Un autre effet des installations, c'est que lors des crues on utilise des évacuateurs qui souvent contribuent à dissoudre en **excès l'azote** de l'air dans l'eau. Les poissons en sont affectés et deviennent sujet à la prédation. Ici, le turbinage de l'eau à la place de l'utilisation de l'évacuateur réduit cet effet et est donc favorable. Malheureusement, il est très rare que les turbines soient dimensionnées pour la crue.

L'autre nuisance créée par le barrage est la **diminution des transits**.

Dans les sites montagneux comme les Alpes, l'Himalaya, les Rocheuses ou les Andes, les eaux sont chargées de **sédiments** qui transportés par les courants se retrouvent inévitablement dans les océans et lors des crues viennent enrichir les terres inondés. L'installation de barrages vient évidemment perturber ce transit, les sédiments se déposant dans les réservoirs au point de les remplir à plus ou moins long terme. Ce phénomène peut être géré en utilisant des dispositifs de vidange de fond.



Vanne de fond utilisé pour vidanger un réservoir de ses sédiments

Le **transit de la faune aquatique** est aussi perturbé par les barrages.

Cela affecte surtout les espèces qui ont besoin de migrer entre les océans et les rivières. Il y a les poissons anadromes qui remontent les rivières pour se reproduire et les poissons catadromes qui retournent à la mer pour se reproduire. Les saumons, aloses et esturgeons sont anadromes et les anguilles catadromes. Ce sont ces espèces qui suscitent le plus de préoccupations.

Pour la montaison, il y a des passages alternatifs qui permettent efficacement aux poissons de franchir le barrage. Ces installations sont donc construites en parallèle et n'affectent en rien les turbines.



Passage pour saumons adultes à la centrale de McNary

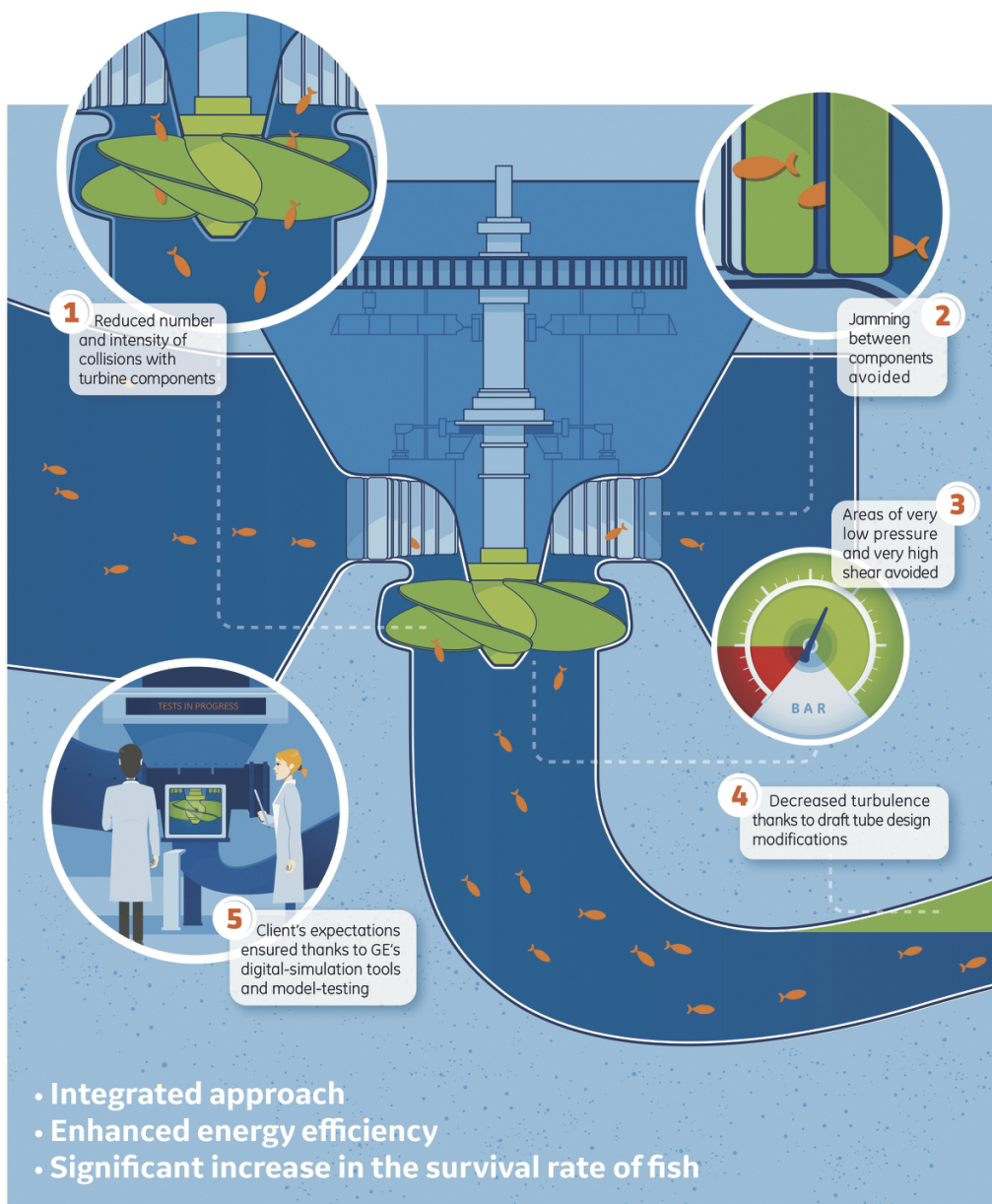
Là où les turbines peuvent être mises à contribution c'est lors de la dévalaison. En effet, pour franchir le barrage, la turbine présente un choix parfois incontournable, ce qui, essentiellement, justifie un travail d'optimisation.

Ces travaux permettent aux grandes turbines de la rivière Columbia d'accroître le taux de survie des alevins de 92 à 98% pour les nouvelles conceptions. Ce sujet est traité en détail *ici* (cf. p.56).



Fish friendly turbine

Whether fitting new turbines, or retrofitting existing equipment, GE Renewable Energy offers innovative and integrated solutions, so that migrating fish are preserved and, when necessary, levels of dissolved oxygen are increased.



© 2018 General Electric Company. All rights reserved.

ge.com/renewableenergy

Étude des phénomènes nuisibles aux poissons dans les turbines



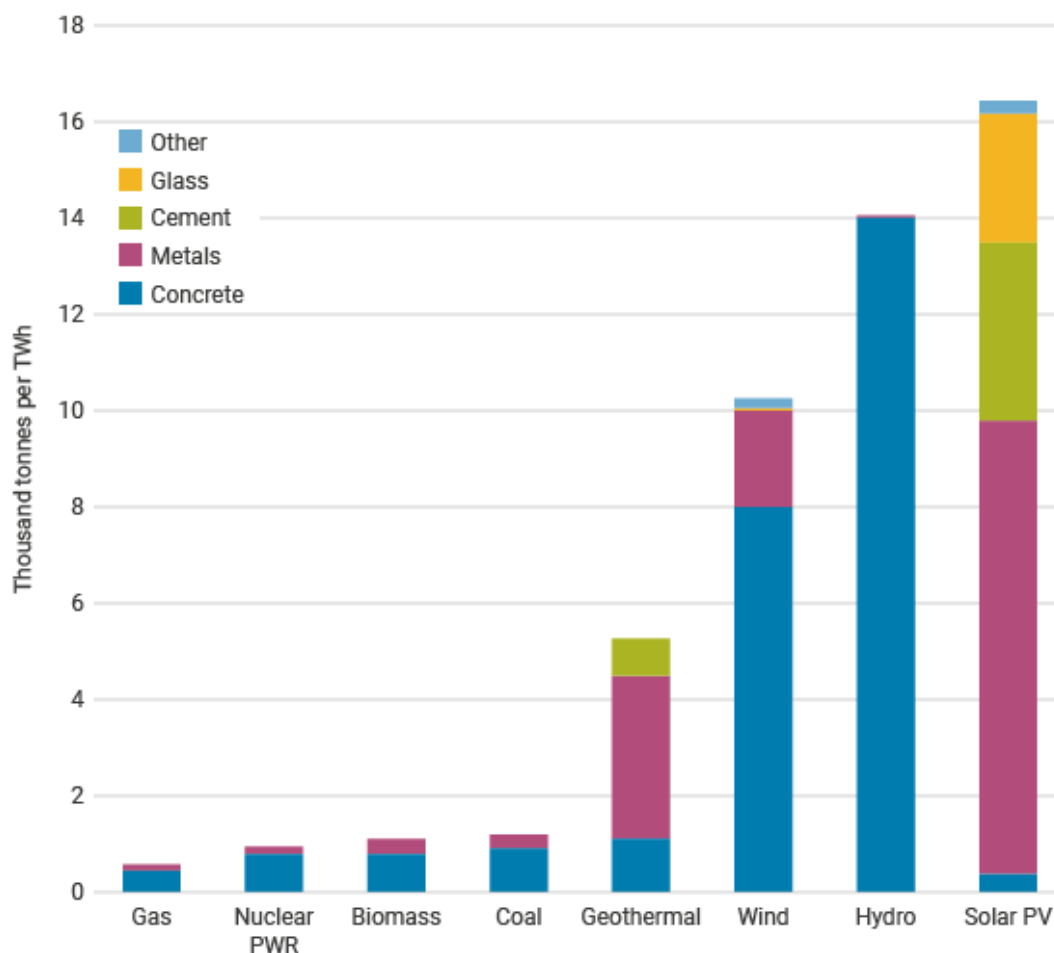
L'hydroélectricité est certainement la source d'énergie qui affecte les plus grandes surfaces de territoire. Toutefois, les impacts les plus importants font l'objet de solutions d'atténuation et globalement s'estompent dans le temps.

Pour beaucoup de cas, le développement de projet hydroélectrique a permis d'étudier en profondeur les systèmes écologiques sur des territoires qui deviennent plus accessibles, de les développer et d'en permettre une exploitation avantageuse socialement. C'est aussi l'occasion de faire des inventaires de la faune et de la flore et de mieux comprendre comment ils sont affectés pour y remédier efficacement.

6. Consommation de matériaux

Le concept de l'énergie renouvelable repose sur les processus naturels qui sont continuellement renouvelés. Il convient donc de s'attarder aux matériaux utilisés pour sa mise en œuvre et son exploitation parce qu'à l'instar du carburant, ces matériaux sont consommés et ne sont plus disponibles pour d'autres usages.

On peut donc s'y intéresser sur les aspects quantité et qualité, ce qui est présenté sur le graphique suivant :



Matériaux utilisés par les différentes sources d'énergie

L'aspect quantité est en soi un peu redondant avec l'analyse des émissions des GES^{p.26} et avec le TRE^{p.26}. En effet, les travaux nécessitant l'extraction et le raffinement des matériaux consomment de l'énergie et émettent des GES.

L'analyse des quantités seule est aussi trompeuse. Le degré de rareté des matériaux est à prendre en compte. On ne peut que juxtaposer la rareté des terres rares et l'abondance des matériaux qui servent à faire le béton pour comprendre.

La rareté a un effet sur le coût du matériau ce qui va se refléter sur le coût de l'énergie produite et est donc automatiquement tenu en compte dans les choix énergétiques à la condition que les autres aspects aussi (en particulier les GES) pénalisent les coûts.



Quoiqu'il en soit, il convient de remarquer que :

- L'énergie hydraulique fait appel à de grande quantité de béton qui est abondant et disponible et d'un peu de métaux.
- Les énergies éolienne et solaire utilisent en grande quantité des matériaux plus exotiques et des métaux.
- Les énergies thermiques utilisent un peu de béton et des quantités de métaux.

Sur cet aspect des matériaux, c'est l'énergie nucléaire qui en nécessite le moins.

En terme de développement durable, l'exploitation de l'énergie hydraulique présente globalement le moins d'impact sur l'environnement, tout en étant très souvent acceptable sur les plans sociaux et économiques.

C'est une source d'énergie renouvelable, dont l'exploitation présente la plus grande efficacité, émet très peu de GES et présente un TRE supérieur à toute autre source d'énergie. Elle présente un risque de mortalité assez faible, occupe un large espace dans la biosphère et utilise beaucoup de béton. Par sa flexibilité d'exploitation due aux grands réservoirs et aux installation de pompage-turbinage, elle facilite la gestion du réseau en permettant d'accepter des modes de production constants comme le thermique et le nucléaire et des modes de production intermittents comme l'éolien et le solaire.

Sur un réseau électrique, l'hydroélectricité est un atout incontournable.

Exercice : Exercices

[solution n°1 p. 24]



1

Quel est le rendement des alternateurs hydrauliques utilisés dans les centrales hydroélectriques?

- Moins de 79 %
- De 80 % à 84 %
- De 85 % à 89 %
- De 90 % à 94 %
- Plus de 95 %

2

Le taux de retour énergétique pour l'hydroélectricité se situe à :

- De 0,7 à 1,7.
- Environ 95%.
- Environ 90%.
- Plus de 50.
- Aucune de ces réponses.

3

Combien de grammes équivalents CO₂ sont émis par kWh produit par une centrale hydroélectrique réservoir?

- Moins de 9 g éq CO₂/kWh
- 10 à 35 g éq CO₂/kWh
- 36 à 50 g éq CO₂/kWh
- 51 à 70 g éq CO₂/kWh
- Plus de 71 g éq CO₂/kWh

4

Parmi les sources d'énergie suivantes, laquelle le taux de mortalité le plus faible ?

- L'énergie éolienne.
- L'énergie solaire.
- L'énergie du gaz naturel.
- L'énergie nucléaire.
- L'énergie hydraulique.

Solutions des exercices



Solution n°1

[exercice p. 22]

1

Quel est le rendement des alternateurs hydrauliques utilisés dans les centrales hydroélectriques?

- Moins de 79 %
- De 80 % à 84 %
- De 85 % à 89 %
- De 90 % à 94 %
- Plus de 95 %

2

Le taux de retour énergétique pour l'hydroélectricité se situe à :

- De 0,7 à 1,7.
- Environ 95%.
- Environ 90%.
- Plus de 50.
- Aucune de ces réponses.

3

Combien de grammes équivalents CO₂ sont émis par kWh produit par une centrale hydroélectrique réservoir?

- Moins de 9 g éq CO₂/kWh
- 10 à 35 g éq CO₂/kWh
- 36 à 50 g éq CO₂/kWh
- 51 à 70 g éq CO₂/kWh
- Plus de 71 g éq CO₂/kWh

4

Parmi les sources d'énergie suivantes, laquelle le taux de mortalité le plus faible ?

- L'énergie éolienne.
- L'énergie solaire.

- L'énergie du gaz naturel.
- L'énergie nucléaire.
- L'énergie hydraulique.

Glossaire



GES

Gaz à effet de serre

TRE

Taux de rendement énergétique

Bibliographie



- [**Amaral et al. (2010)**] Stephen V. Amaral and George E. Hecker, “Designing leading edges of turbine blades to increase fish survival from blade strike”, EPRI 2010
- [**Becker et al. (2003)**] James M. Becker, C. Scott, Abernethy, and Dennis D. Dauble, “Identifying the Effects on Fish of Changes In Water Pressure during Turbine Passage”, Hydro Review, Volume 22, Number 5, September 2003
- [**Brown (2012)**] Richard S. Brown, “Quantifying Mortal Injury of Juvenile Chinook Salmon Exposed to Simulated Hydro-Turbine Passage”, Transactions of the American Fisheries Society, February 2012
- [**Cada et al. (1997)**] Gleen F. Cada, Charles C. Coutant, Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory, “Development of Biological Criteria for the Design of Advanced Hydropower Turbines”, DOE, March 1997
- [**CIRAIG (2014)**] CIRAIG (2014). Résultats semblables à ceux du GIEC (2011); 2 Tremblay et coll. (2005)
- [**Foust et al. (2013)**] [9] Jason M. Foust, Richard K. Donelson, Martin Ahmann, Bob Davidson, Jim Kiel and Tom Freeman, “Model Testing for Fish Passage: Evaluating Ice Harbor Turbine Improvements”, 2013
- [**Odeh et al. (1999)**] Mufeed Odeh, “A Summary of Environmentally Friendly Turbine Design Concepts”, DOE, July 1999
- [**Scott et al. (2018)**] Scott David, Simmons Neal, Bornard Laurent, Toussaint Kristopher, "New aerating turbine for increasing dissolved oxygen levels at High Rock Dam", Charlotte, HydroVision 2018.

Webographie



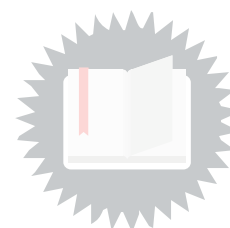
[Comparaison de la production de GES des options de production d'électricité]

http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/pdf/pop_01_06.pdf

[T&D losses in USA] <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=105&t=3>

[Wikipedia - Taux de retour énergétique] https://fr.wikipedia.org/wiki/Taux_de_retour_%C3%A9nerg%C3%A9tique

Index



admission d'air.....	44
aération	44
air admission.....	44, 44
Auto-lubrifiants.....	41
bubles	44
bulles	44
Développement durable.....	4, 4
Efficacité énergétique	4
Energy Return on Energy Inversted.....	6
Environnement	4
EROEI	4, 6
fish	56
fish friendly turbines.....	56
Gaz à effet de serre.....	4, 8
GES.....	4, 8
oxygénation.....	44
oxygène dissout	44
Palier à l'eau	41
Palier hydrostatique.....	41
Performance environnementale	4
Performances	36
poisson	56
Self-lub	41
Surclassement.....	36
Taux de retour énergétique.....	4, 6
TRE.....	6
turbines ichtyophiles	56
Upgrade.....	36

Crédits des ressources



Exemples de choix effectués lors d'une réhabilitation p. 36

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Remplacement de toute les pièces démontables de la turbine, assemblage en atelier et livraison en bloc p. 37

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Assemblage sur la plage de montage – manutention pour 320 tonnes p. 37

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Selon le besoin, l'effet très variable d'un changement de roue p. 38

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

La réhabilitation de Chief Joseph : un succès sans compromis p. 38

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Remplacement des directrices, avantage typique mesuré sur modèle p. 39

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Avantage des avant-directrices p. 40

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Modification d'une avant-directrice par extension du bord d'attaque p. 40

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Modification d'envergure de 2 avant-directrices par une extension faite d'une coque d'acier remplie de béton p. 40

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Loiseau F., Munro I., St-Hilaire A., Couston M., Sabourin M., *Rehabilitation of Propeller Turbines, A case study: CHATS FALLS Power Plant, Hydrovision 2005.*

Modification d'un aspirateur p. 41

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Résultats au site d'un aspirateur modifié comparé à un aspirateur original à Kelsey p. 41

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Loiseau F., De Henau V., Sabourin M., *Importance of Draft Tube in Rehabilitation Project, IAHR-24th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Foz do Iguassu, Brazil, 2008.*

Évolution dans le temps des rendements des turbines hydrauliques p. 5

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>,

https://www.vgb.org/hydropower_fact_sheets_2018.html?dfid=91646 d'après ANDRITZ HYDRO GmbH, 2018

Efficacité des différentes sources d'énergie p. 6

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>,

https://www.vgb.org/hydropower_fact_sheets_2018.html?dfid=91646, figure 2, page 14.

Le Taux de Retour Énergétique selon certaines sources citées par Wikipédia p. 7

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>,

https://fr.wikipedia.org/wiki/Taux_de_retour_%C3%A9nerg%C3%A9tique

Taux de retour énergétique comparés selon Hydro-Québec p. 7

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>,

https://www.vgb.org/hydropower_fact_sheets_2018.html?dfid=91646, page 13, figure1. D'après Hydro-Québec Direction – Environnement, 2005.

Vue sur le réservoir amont de Grand Maison situé à plus de 900 m au dessus du réservoir aval p. 8

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>,

<https://www.usinenouvelle.com/article/cinq-questions-sur-le-blocage-de-l-usine-hydro-electrique-edf-de-grand-maison.N922124>

Comparaison en production de GES des options de production d'électricité suivant les scénarios minimum et maximum p. 9

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/pdf/pop_01_06.pdf
http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/pdf/pop_01_06.pdf

Comparaison des émissions en GES de différentes filières énergétiques p. 9

<https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/emissions-ges.pdf>

Équivalent en CO2 pour un cycle de vie moyen p. 10

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>, <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/nuclear-energy-and-sustainable-development.aspx>

Projection des émissions nettes de GES par Hydro-Québec p. 10

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>,

<https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/emissions-ges.pdf>

Taux de mortalité par source d'énergie p. 12

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Deaths by Energy Source in Forbes Brian Wang | June 11, 2012 <https://www.nextbigfuture.com/2012/06/deaths-by-energy-source-in-forbes.html>

La source d'énergie la plus sûre vous surprendra p. 12

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>, Published on May 10, 2018 By Jeff Desjardins <https://www.visualcapitalist.com/worlds-safest-source-energy/>

L'aménagement de LG2 comporte un déversoir et deux centrales (Robert-Bourassa et La Grande-2-A) pour une capacité de 7722 MW. p. 14

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>,

<http://www.hydroquebec.com/production/images/centrales/robertbourassa-01.jpg>

Les réservoirs créés par le projet de la Baie James couvrent un territoire qui se mesure en centaines de kilomètres p. 14

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, © Michel Sabourin 2020 à partir de Google Maps

Étude détaillée des effets des mesures de mitigation p. 15

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>,

<https://www.hydroquebec.com/data/romaine/pdf/romaine-bilan-environnement-2018.pdf>

Aménagements de frayères p. 15

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>,

<http://www.hydroquebec.com/data/romaine/pdf/frayere.pdf>

Partage de l'espace p. 15

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>,

<https://www.hydroquebec.com/data/administrations-municipales/pdf/20190326-installations-amenagement-territoire.pdf>

Cheminement du mercure peu après la mise en eau des réservoirs p. 16

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, <https://www.hydroquebec.com/developpement-durable/documentation-specialisee/mercure.html> Figure 1.3

Évolution de la teneur en mercure des dorés jaunes p. 17

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, <https://www.hydroquebec.com/developpement-durable/documentation-specialisee/mercure.html> Figure 1.6

Utilisations et avantages des auto-lubrifiants p. 42

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©Michel Sabourin

Les auto-lubrifiants se présentent sous diverses configurations adaptées aux mécanismes. p. 42

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Configuration du palier hydrostatique à l'eau p. 43

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Avantages du palier hydrostatique à l'eau p. 43

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Moyeu de Kaplan sans huile p. 44

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Endroits concernés par la préoccupation de l'oxygène dissout p. 44

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Propriétés chimiques et effet biologique de la concentration en oxygène dissout p. 45

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©Michel Sabourin

Admission d'air par effet venturi dans un modèle p. 46

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Équation de la dissolution de l'oxygène dans l'eau p. 46

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©Michel Sabourin

En fonction de l'endroit d'introduction, la quantité d'oxygène introduit n'est pas la même p. 47

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Essai modèle montrant la perte de rendement p. 47

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Papillon B., Kirejczyk J., Sabourin M., *Determination of Similitude Rules for Hydroturbines Aeration*, HydroVision, Charlotte North Carolina, 2000.

Modèle avec torche aérée p. 48

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Localisation des points d'entrée et d'injection d'air pour une aération centrale p. 48

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Papillon B., Kirejczyk J., Sabourin M., *Determination of Similitude Rules for Hydroturbines Aeration*, HydroVision, Charlotte North Carolina, 2000.

Limites d'apparition de la torche avec et sans air p. 49

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©Michel Sabourin 2018

Comparaison de 3 points de fonctionnement, faible, coeur et pleine charge dans aération, avec aération centrale et périphérique p. 51

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Papillon B., Sabourin M., Couston M., Deschênes C., *Methods for Air Admission in Hydroturbines*, Proceedings of the XXI IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Lausanne, 2002.

L'aération centrale est aussi utilisée pour atténuer le bruit et les fluctuations de pression avec très peu d'air p. 51

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Papillon B., Kirejczyk J., Sabourin M., *Atmospheric air admission in hydroturbines*, Hydrovision 2000, Charlotte, USA.

Observation du volume de la torche sous différentes chutes p. 52

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Papillon B., Kirejczyk J., Sabourin M., *Determination of Similitude Rules for Hydroturbine Aeration*

Validation et limite de la similitude p. 53

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Papillon B., Kirejczyk J., Sabourin M., *Determination of Similitude Rules for Hydroturbines Aeration*, HydroVision, Charlotte North Carolina, 2000.

Pour une même quantité d'air une étude de la dispersion et de la dimension des bulles p. 54

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Aération par le bord de fuite des aubes p. 54

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, © Voith <http://voith.com/corp-en/service-products/hydropower/environmentally-friendly-hydro-products/aerating-turbine-technology.html><http://voith.com/corp-en/service-products/hydropower/environmentally-friendly-hydro-products/aerating-turbine-technology.html><http://voith.com/corp-en/service-products/hydropower/environmentally-friendly-hydro-products/aerating-turbine-technology.html>

Représentation schématique du dispositif d'aération de GE p. 55

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE, Scott David, Simmons Neal, Bornard Laurent, Toussaint Kristopher, "New aerating turbine for increasing dissolved oxygen levels at High Rock Dam", Charlotte, HydroVision 2018.

Distribution de l'air introduit au bord d'attaque d'un profil inter-aube. p. 55

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE, Scott David, Simmons Neal, Bornard Laurent, Toussaint Kristopher, "New aerating turbine for increasing dissolved oxygen levels at High Rock Dam", Charlotte, HydroVision 2018.

Résultat de l'implantation de la solution GE à High Roch p. 56

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, © U.S. Department of Energy

Vanne de fond utilisé pour vidanger un réservoir de ses sédiments p. 18

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>, Ludovic Péron, CC BY-SA 3.0

<<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/Vanne_de_fond_du_barrage_de_l%27Hongrin_dans_le_L%](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/Vanne_de_fond_du_barrage_de_l%27Hongrin_dans_le_L%27)

Passage pour saumons adultes à la centrale de McNary p. 18, 56

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>,

<https://www.salmonrecovery.gov/Hydro/Structuralimprovements/AdultFishLadders.aspx>

Les zones identifiées où la survie des poissons est préoccupantes p. 57

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, GE

Taux théorique de survie comparé en fonction du nombre de barrages franchis et du type de turbine. p. 57

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©Michel Sabourin

Localisation des dangers de blessures dans une turbine p. 59

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>,

www.esd.ornl.gov/human_health_risk/env_analysis/hydro_effects.shtml

Analyse par logiciel des mécanismes de blessure, localisation et identification des causes p. 60

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Évolution des pressions dans une turbine p. 61

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, James M. Becker, C. Scott, Abernethy, and Dennis D. Dauble, "Identifying the Effects on Fish of Changes In Water Pressure during Turbine Passage", *Hydro Review*, Volume 22, Number 5, September 2003

Taux de survie à l'impact p. 61

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Stephen V. Amaral and George E. Hecker, "Designing leading edges of turbine blades to increase fish survival from blade strike", EPRI 2010

Un modèle de collision p. 62

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Z. Deng, T. J. Carlson, G. R. Ploskey, M. C. Richmond, "Evaluation of Blade-Strike Models for Estimating the Biological Performance of Large Kaplan Hydro Turbines", PNNL November 2005

Effet du cisaillement sur la mortalité des poissons mesuré en laboratoire p. 63

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, D. A. Nietzel, G. F. Čada, "Laboratory Studies on the Effects of Shear on Fish", DOE, September 2000

Effet de la turbulence et dimension des tourbillons dans la turbine p. 63

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Mufeed Odeh, John F. Noreika, Alex Haro Aubin Maynard, Ted Castro-Santos, and Glenn F. Cada, "Evaluation of the effects of turbulence on the behavior of migratory fish", DOE-BPA (Bonneville Power Administration), March 2002

Photos prises au laboratoire de Vicksburg p. 64

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, GE

Analyse et localisation des collision par CFD p. 64

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Analyse et localisation des coincements et abrasions par CFD p. 65

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

La roue Kaplan à jeu minimal p. 65

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

La diminution des accélérations est favorable sur plusieurs aspects p. 66

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Le voisinage des directrices présentent des pièges pour les poissons p. 66

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

La grille à poisson perturbe de façon considérable les écoulements, réduit les performances et crée de la nuisance additionnelle pour les poissons qui ne sont pas capturés p. 67

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, ©GE

Étude des phénomènes nuisibles aux poissons dans les turbines p. 19

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, <https://www.ge.com/news/reports/go-with-the-flow-these-engineers-are-building-a-fish-friendly-hydropower-plant>

Matériaux utilisés par les différentes sources d'énergie p. 20

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/nuclear-energy-and-sustainable-development.aspx>



1. L'amélioration des performances

Une grande partie des préoccupations environnementales proviennent des économies matures disposant déjà d'un parc de machines sujettes à une éventuelle réhabilitation. C'est dans ce contexte que l'amélioration des performances est considérée.

Bien sûr, pour les nouvelles installations, les mêmes technologies peuvent être appliquées. S'il n'y a pas de surcoût associé, ce sera automatique. Autrement, l'appel d'offre devra judicieusement donner une méthode d'évaluation qui permettra l'optimisation de la machine pour le développement durable.

On comprend que l'amélioration des performances permet d'éviter le gaspillage de la ressource à la source. C'est un gain énergétique, de puissance ou de réduction des coûts de maintenance qui est directement favorable à la rentabilité économique du projet qui s'impose de lui même grâce aux développements technologiques. L'appel d'offre devra donc présenter comment l'évaluation de ces aspects permettra aux soumissionnaires de gagner le contrat.

Les *technologies développées* (cf. p.36) pour améliorer les performances lors des projets de réhabilitations sont bien celles dont il est question ici. Il s'agit principalement de diminuer les pertes singulières c'est-à-dire, les pertes par chocs, les défauts d'incidence, les expansions brusques, les pointes d'énergie cinétique, bref des pertes qui dépendent du degré d'optimisation de la conception hydraulique.

Certains peuvent craindre que ces améliorations de performance pourraient pénaliser d'autres aspects environnementaux, on pense en particulier à la survie des poissons. Or, en général, il n'en est rien et on le verra plus bas.

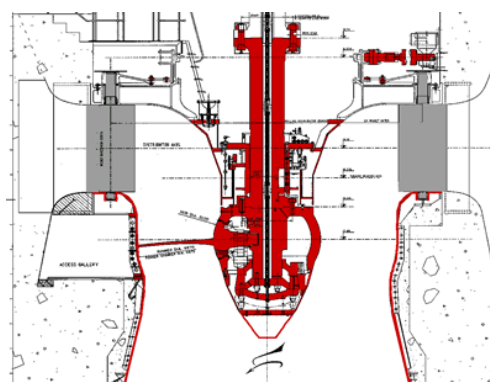
2. Les solutions technologiques

Les choix de solutions adaptés

Sans être une règle, différents remplacements, réparations et modifications sont des options à considérer.

On a donc les choix suivants :

- Remplacement de la roue ou réparation.
- Remplacement des directrices ou réparation.
- Augmentation de la course des directrices.
- Embiellage modifié.
- Restauration du servomoteur ou course. augmentée ou remplacement.
- Correction des avant-directrices.
- Modification de l'aspirateur.
- Remplacement des pièces d'usure des mécanismes par des auto-lubrifiants et rebut des systèmes de graissage.



■ Remplacé

■ Réparé

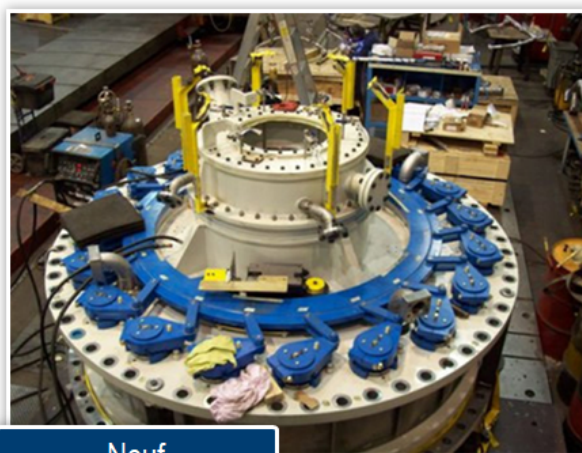
Exemples de choix effectués lors d'une réhabilitation

- Remplacement de tous les boulons, vis et écrous de moins de 63,5mm.
- Remplacement de la tuyauterie de moins de 50 mm de diamètre.
- Etc.

La stratégie "Pit stop"



Original



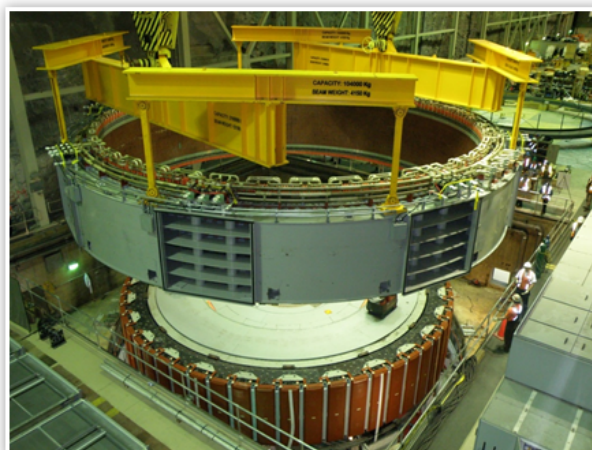
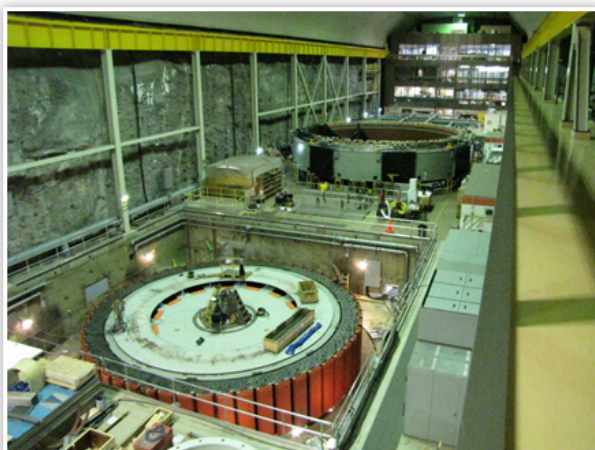
Neuf

Gain d'un mois sur la production

Remplacement de toute les pièces démontables de la turbine, assemblage en atelier et livraison en bloc
 Démontage du distributeur d'origine au travers du stator.

Le nouvel ensemble est beaucoup plus léger (24100 lbs) car il comporte des directrices neuves en CA6NM, un flasque supérieur plus simple, et un palier hydrostatique.

Nous avons un gain de un mois, et c'est beaucoup.



Gain de 1½ à 6 mois par groupe

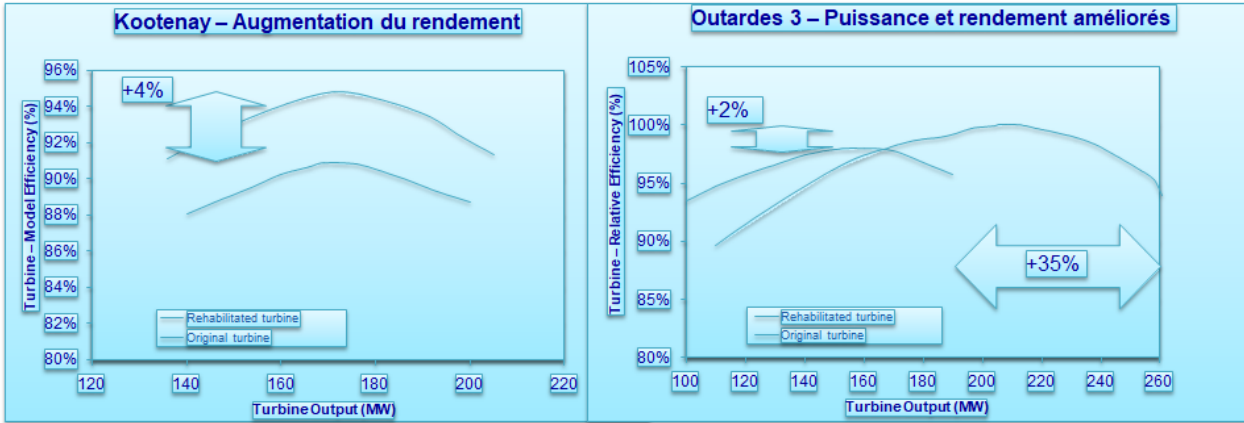
Assemblage sur la plage de montage – maintenance pour 320 tonnes

Par une conception appropriée permettant l'assemblage de l'alternateur sur la plage de montage de la centrale, on peut réduire les temps de retrait de production de 6 mois à 45 jours.

Remplacement de la roue

Un incontournable, le remplacement de la roue donne des avantages immédiats :

- Acier inox pour la résistance à la cavitation et à la corrosion.
- L'usinage 5 axes pour une homologie parfaite.
- Jusqu'à 5% d'augmentation de rendement.
- Jusqu'à 40% d'augmentation de performance.

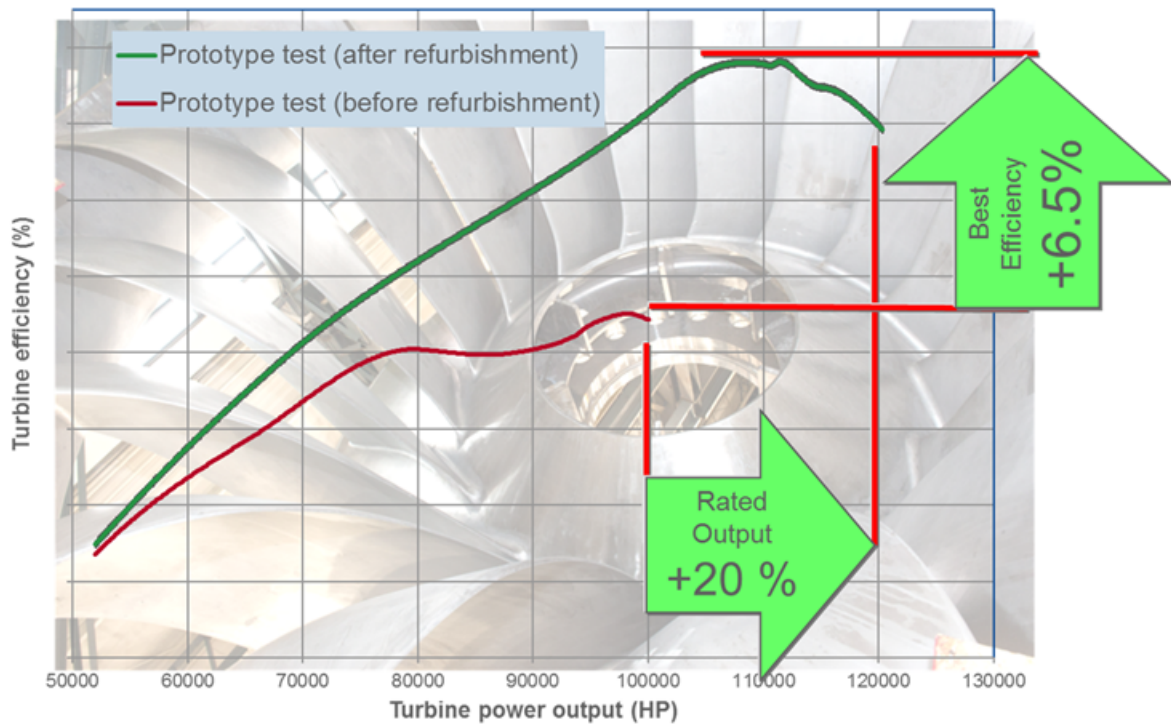


Selon le besoin, l'effet très variable d'un changement de roue

La difficulté technologique est le couplage de la roue avec l'aspirateur existant.

L'investissement est majeur mais très rentable.

Chief Joseph Rehabilitation



La réhabilitation de Chief Joseph : un succès sans compromis

Le changement de roue s'est accompagné d'un remplacement des directrices et d'un reprofilage des avant-directrices.

Le remplacement des directrices

Permet :

- Amélioration significative du rendement sous toutes les charges.
- Acier inoxydable pour un fini de surface de qualité et durable.
- 2 types d'améliorations qui se cumulent:
 - Profil pour ~0.5%
 - Fini de surface ~2.0%

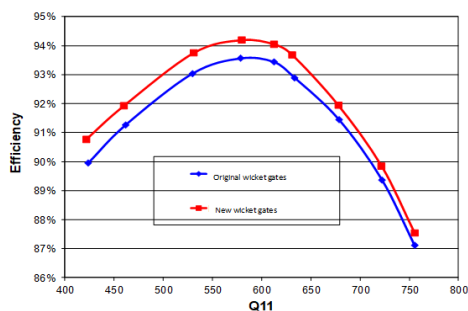
En projet de réhabilitation Francis, le changement des directrices est presque toujours associé au changement de roue car il permet d'obtenir la majoration.

Au cours de l'expérience acquise depuis vingt ans en réhabilitation, rapidement le changement des directrices s'est imposé dans presque tous les cas depuis 1997.

Il y a d'abord l'augmentation du rendement sur toute la plage d'opération. Ceci est dû au profil mieux adapté mais aussi à l'amincissement du voile à cause du matériau utilisé.

Généralement, les directrices existantes sont en acier doux et l'acier inox 13-4 permet tolérer l'augmentation des contraintes. Sur modèle réduit, l'augmentation des performances est de l'ordre de 0.5%.

Toutefois, l'avantage principal réside dans l'amélioration du fini de surface qui peut facilement donner des augmentations qui dépassent largement le pourcent. De fait la restauration des directrices existantes qui se trouvent sur le chemin critique coûte très cher. Ajouté à cela, les douilles en inox 410 pour les paliers auto-lubrifiants, leur remplacement devient très rentable.



Remplacement des directrices, avantage typique mesuré sur modèle

Modification des avant-directrices

L'écoulement dans les avant-directrices est parfois pénalisé par un défaut d'incidence au bord d'attaque. Suivant l'envergure du défaut et les propriétés mécaniques de l'avant-directrice existante plusieurs solutions peuvent être envisagées.

Le résultat attendu est :

- d'éviter le décollement au bord d'attaque.
- d'augmenter le rendement de façon significative.

Alors que les remplacements de roues et directrices sont très commun en réhabilitation, les modifications d'avant directrices sont plus rares mais peuvent donner des améliorations de rendement très importantes.

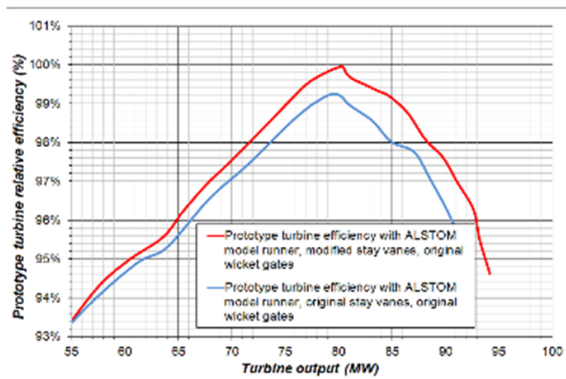
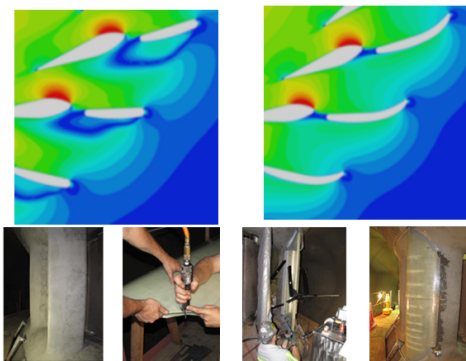
Voici quelques projets où la modification des avant-directrices a permis d'augmenter le rendement jusqu'à 2,25%.

- Kelsey;
- Island Falls;
- Chief Joseph;

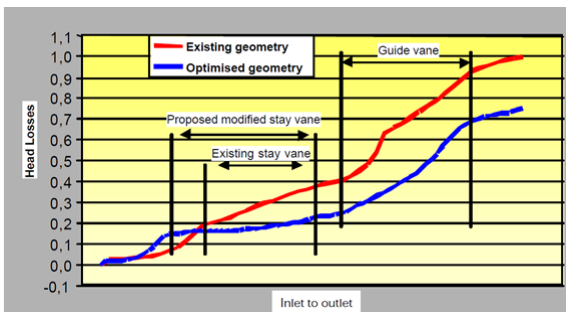
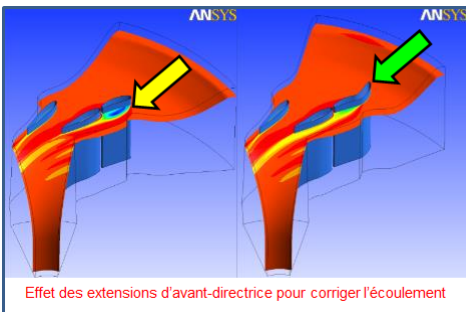
- Chat Falls;
- Kootenay;
- Guri 1;

Il existe différentes méthodes et matériaux :

- Techniques conventionnelles:
 - Extensions usinées soudées en place.
 - Coque en acier remplie de béton.
- Approche avec matériaux composites.
 - Coque en fibre de verre remplie d'un casting époxy.



Avantage des avant-directrices



Modification d'une avant-directrice par extension du bord d'attaque

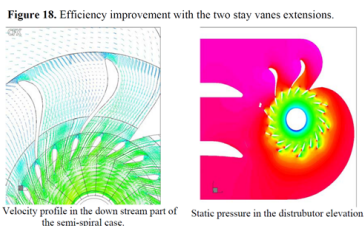
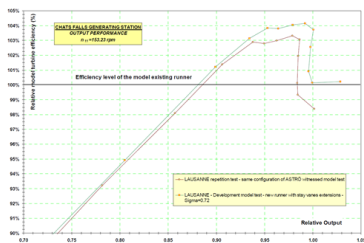
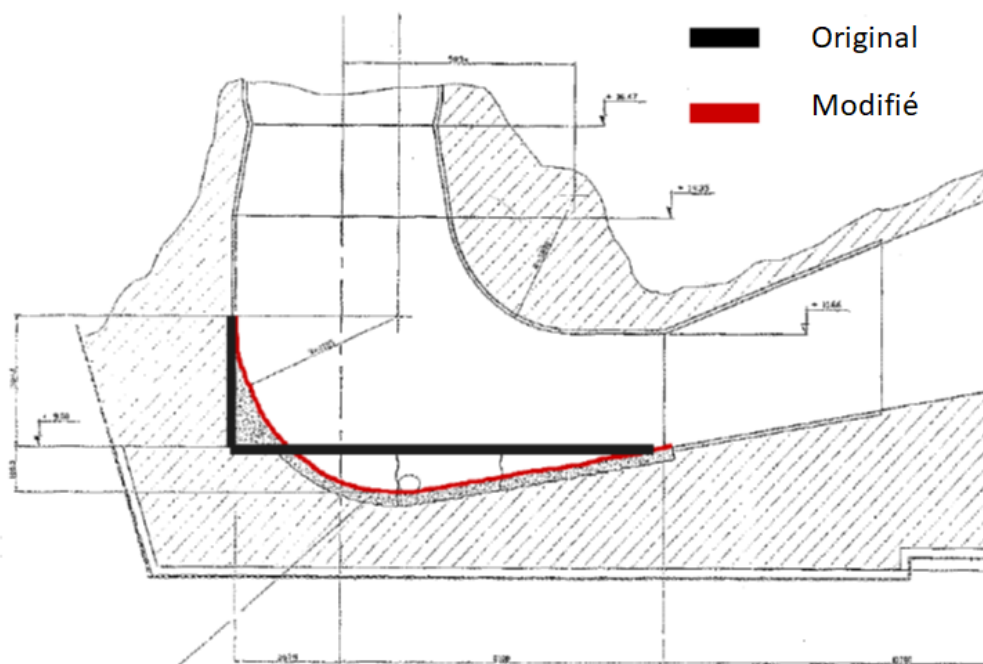


Figure 17. Erection of stay vane extensions on model.

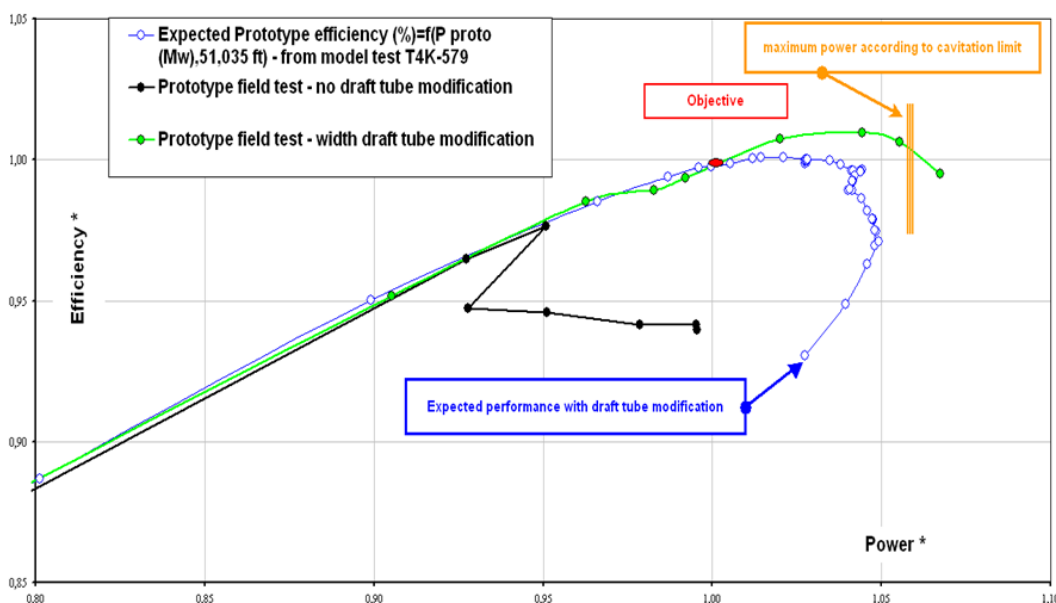
Modification d'envergure de 2 avant-directrices par une extension faite d'une coque d'acier remplie de béton

Modification de l'aspirateur

Conçu par l'hydraulicien, l'aspirateur de fait pas partie de la fourniture et est généralement intégré dans la structure de la centrale. Toutefois, surtout en basse chute, il joue un rôle capital dans la production d'énergie. Les conceptions anciennes peuvent être déficientes et méritent qu'on les étudie. Ces études menées par CFD doivent être analysées avec beaucoup de précaution et validées par essais sur modèle réduit.



Modification d'un aspirateur



Résultats au site d'un aspirateur modifié comparé à un aspirateur original à Kelsey

3. Réduction des lubrifiants minéraux

Les lubrifiants sont utilisés dans les mécanismes pour réduire la friction et l'usure et aussi permettre l'évacuation de la chaleur.

On utilise de l'huile dans les paliers guides et de butées de même que pour actionner les servomoteurs hydrauliques. Cette huile circule en boucle dans les systèmes, est filtrée de façon continue et toute fuite est normalement corrigée rapidement. Normalement, il n'y a pas de consommation d'huile.

Toutefois, dans les roues de type Kaplan, le moyeu est rempli d'huile et il peut y avoir une fuite au joint entre les tourillons de pales et le moyeu. Sa réparation devient une intervention majeure qui demande l'arrêt du groupe pour une certaine période de temps. Ce risque est le plus important en ce qui concerne l'huile.

La graisse est aussi utilisée pour les joints du mécanisme de vannage et les paliers guides des directrices. Le graissage s'effectue de façon continue et la graisse ainsi consommée se trouve en grande partie libérée dans l'eau. C'est une source de pollution importante.

Il devient donc pertinent de s'attarder à la réduction de l'utilisation des lubrifiants minéraux.

Généralisation de l'utilisation des auto-lubrifiants



Les auto-lubrifiants sont des matériaux composites à base de polymère, de graphite et de bronze qui permettent le glissement des mécanismes dans l'air ou l'eau ambiante. Ils ne produisent que très peu de déchet. Ils sont utilisés depuis les années 80.

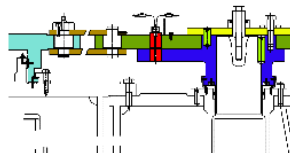
Installés dans tous les mécanismes

- Directrices
- Mécanisme de vannage
- Guidage du cercle de vannage
- Servomoteurs
- Assises croisillons stator
- Robinets papillon et sphérique (paliers et assises)
- Roues Kaplan
- Paliers guides
- Joints d'arbres

Avantage sur le bronze graissé

- Moins chers à l'achat et à l'entretien
- Évitent de rejeter de la graisse dans l'environnement
- Fiables et durables
- Friction faible

Utilisations et avantages des auto-lubrifiants



Les auto-lubrifiants se présentent sous diverses configurations adaptées aux mécanismes.

Palier hydrostatique à l'eau

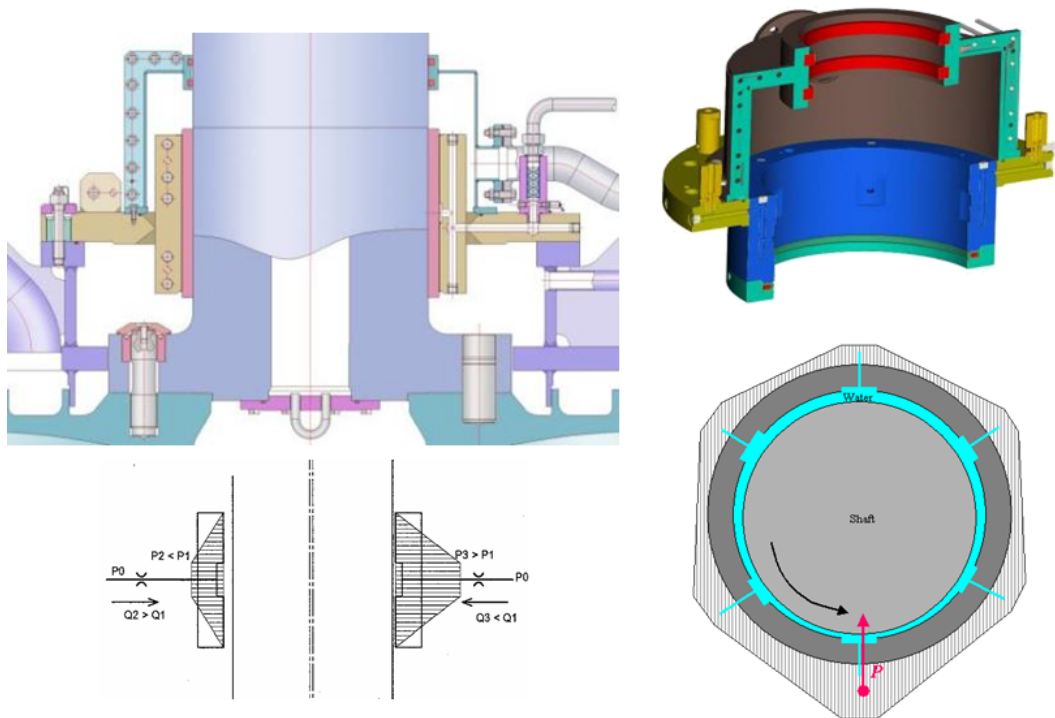


L'eau peut être utilisée comme lubrifiant dans des dispositifs qui ont été conçus à cet effet. Le palier hydrostatique à l'eau fait partie de ceux-ci.

Il s'agit d'un palier dont le lubrifiant est de l'eau filtrée et pressurisée. S'il y a une fuite, il n'y a donc pas de pollution.

De fait, on utilise ce palier pour une fonction additionnelle au guidage, il agit aussi comme joint d'arbre. Il en résulte une conception élégante, compacte et efficace.

Cependant, il ne peut être utilisé sur toute la gamme des machines. Il est recommandé sur les petites machines à cause de leur vitesse de rotation plus importante.



Configuration du palier hydrostatique à l'eau

Comme illustré sur la figure suivante, le palier à l'eau, en plus d'éliminer l'huile, présente de nombreux avantages en permettant une conception plus simple, plus rigide et plus efficace.

Le jeu au labyrinthe

- Conception plus compacte
- Élimine le joint d'arbre

↓

- Diminution du porte-à-faux
- Plus rigide

↓

- Jeu radial réduit

↓

- Jeu au labyrinthe réduit par environ ~0,2 mm et donc réduction de la perte volumétrique

↓

⇒ Augmentation du rendement

Les pertes par friction

- Lubrifiant: eau

↓

- Viscosité inférieure

↓

- Moins de perte par friction

↓

⇒ Pertes par friction réduite de 50%

Avantages du palier hydrostatique à l'eau

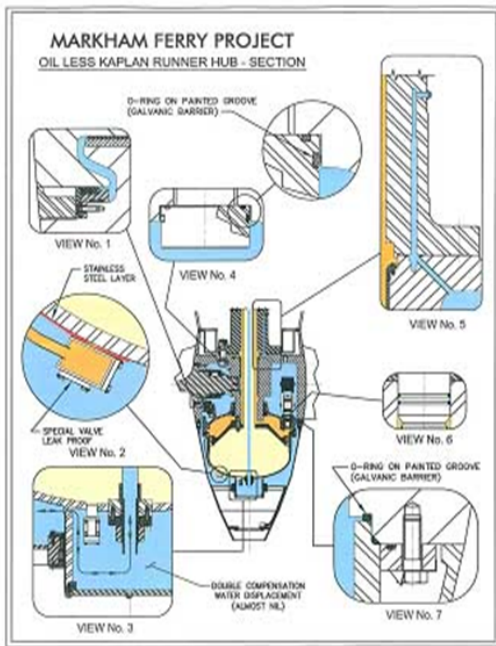
Moyeu de Kaplan sans huile



Comme déjà mentionné, la problématique des fuites d'huile des roues Kaplan est un phénomène susceptible de se produire à plus ou moins brève échéance du à l'usure normale.

Le moyeu d'une roue Kaplan est constitué d'un mécanisme actionné par un servomoteur hydraulique. D'autre part, ce mécanisme est dans un volume non pressurisé rempli d'huile. Or, c'est cette huile qui peut fuir par les joints aux tourillons des pales. Le principe de cette solution est de remplacer l'huile par de l'eau et d'utiliser des paliers et des joints d'étanchéité compatibles avec ce lubrifiant. L'eau est traitée chimiquement pour limiter la corrosion et une protection est appliquée aux composants susceptible de s'oxyder.

Il faut noter qu'avec cette solution, le servomoteur reste avec de l'huile mais il ne présente pas réellement de risque de fuite et par un dispositif de contrôle de la présence d'huile dans cette eau, les fuites beaucoup plus rares au servomoteur sont détectées.



Une conception adaptée:

- Le joint au tourillon s'use avec le temps et l'huile fuit.
- L'huile qui remplit le volume interne est remplacée par de l'eau traitée chimiquement. Cette eau est monitorée pour détecter la présence d'huile.
- Les faces sont protégées par un enduit anti-corrosion.
- On utilise des palier auto-lubrifiants.

Couvre la majeure partie du risque de fuite.

Moyeu de Kaplan sans huile

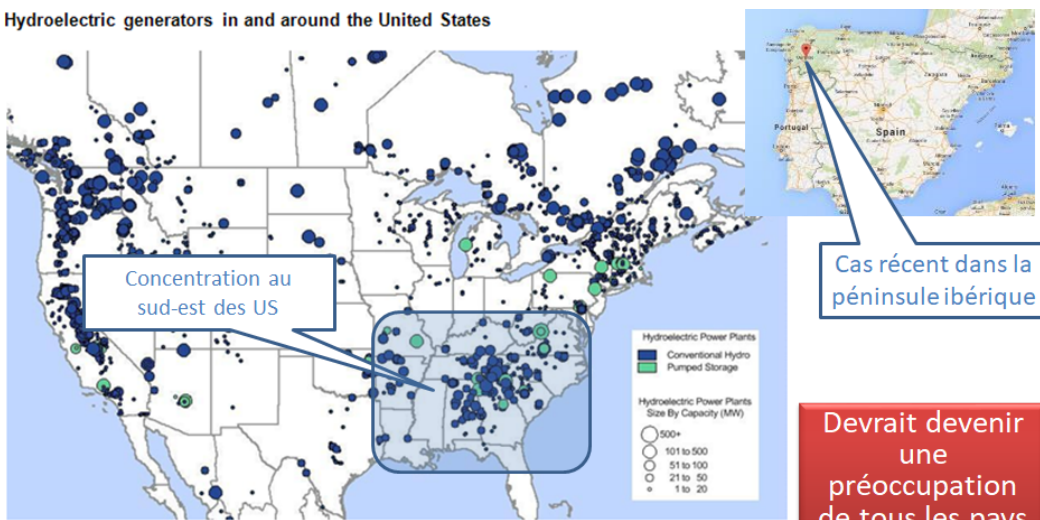
4. Augmentation de l'oxygène dissout

Distribution géographique



Le problème des eaux pauvres en oxygène affectent les régions non-nordiques qui présentent des étés très chauds. Sensible à l'écologie et au développement durable, les premiers à s'en préoccuper, ce sont les États Unis du sud-est. Toutefois, cette préoccupation s'accroît, a atteint récemment la péninsule ibérique et devrait évidemment éventuellement concerner le sud-est asiatique, l'Amérique du Sud et bien d'autres contrées tropicales.

Hydroelectric generators in and around the United States



Source: U.S. Energy Information Administration, derived from Energy Velocity

Devrait devenir une préoccupation de tous les pays non-nordiques

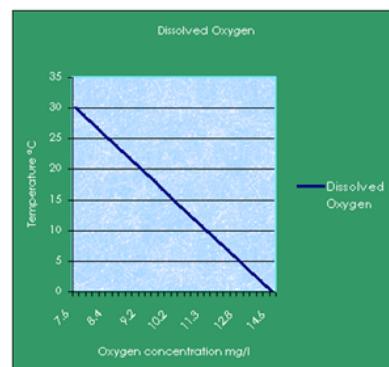
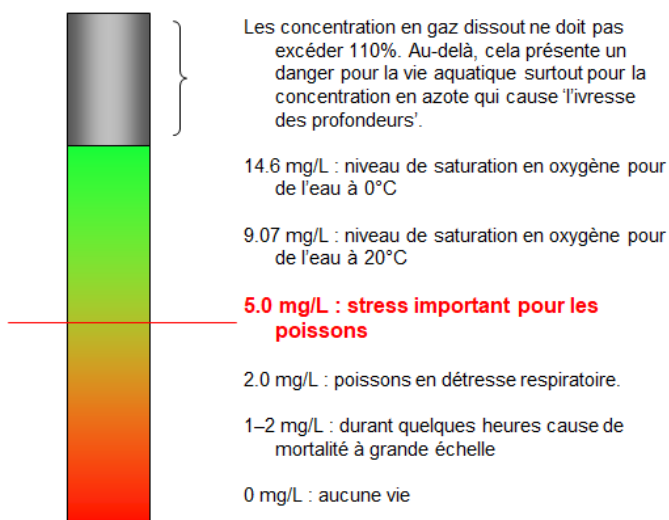
Endroits concernés par la préoccupation de l'oxygène dissout

Effet de l'oxygène dissout sur la vie aquatique



La saturation de l'oxygène dans l'eau varie avec la température, c'est une propriété physique. Cette saturation constitue un maximum qui peut être dépassé dans certaines circonstances, on peut être en sursaturation et il s'agit alors d'une situation instable.

L'activité biologique a besoin de cet oxygène pour assurer le maintien de la vie et il contribue à sa diminution. Suivant les espèces, les poissons ont des besoins variables. Certains poissons sont exigeants en oxygène et vivent naturellement dans les eaux froides.



http://www.lenntech.com/why_the_oxygen_dissolved_is_important.htm



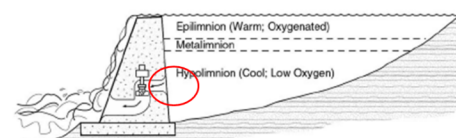
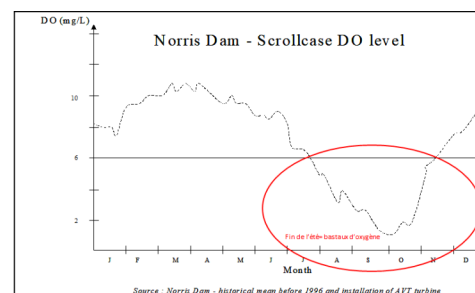
Gasping fish may indicate insufficient levels of DO. Courtesy of NOAA.

Propriétés chimiques et effet biologique de la concentration en oxygène dissout

Le problème

- L'activité biologique en été consomme l'oxygène dans le réservoir amont.
- L'eau turbinée sans oxygène est envoyée dans la rivière et tue ainsi la vie aquatique.
- Il s'agit d'un problème saisonnier et climatique qui affecte certaines régions.

Le problème ne vient pas directement de la turbine mais du barrage qui crée un réservoir où l'eau stagne alors qu'avant le développement hydroélectrique, la turbulence et les courants entraînaient de l'air dans l'eau et favorisait son oxygénation naturellement.



Effet des saisons sur la concentration en oxygène et stratification de l'oxygène dans le réservoir

Une solution efficace: l'admission d'air par effet venturi dans et au voisinage de la roue



On peut oxygéner l'eau de différentes façons. Toutefois, son passage par la turbine constitue une opportunité intéressante qui a démontré son efficacité et son bas coût par rapport aux autres méthodes.

Cette méthode :

- Ne nécessite pas de source d'énergie externe comme des compresseurs.
- La turbulence dans l'aspirateur peut devenir un allié dans la dissolution de l'oxygène.
- C'est une système passif presque sans maintenance ni coût d'exploitation.
- L'admission d'air cause une perte de productivité.



Admission d'air par effet venturi dans un modèle

Ce qui influence la dissolution de l'oxygène



En gros la variation de la concentration d'oxygène dans l'eau répond à l'équation suivante :

$$\frac{dC}{dt} = K_L \cdot a \cdot (C_s - C)$$

Où

- C : est la concentration d'oxygène
- C_s : la concentration initiale
- a : la surface d'échange
- K_L : facteur englobant la pression, la turbulence, le rotationnel, etc.

Équation de la dissolution de l'oxygène dans l'eau

Les facteurs clés sont:

- Le nombre et la dimension des bulles.
- Leur distribution dans l'écoulement.

Les trois endroits pour admettre de l'air au voisinage de la roue

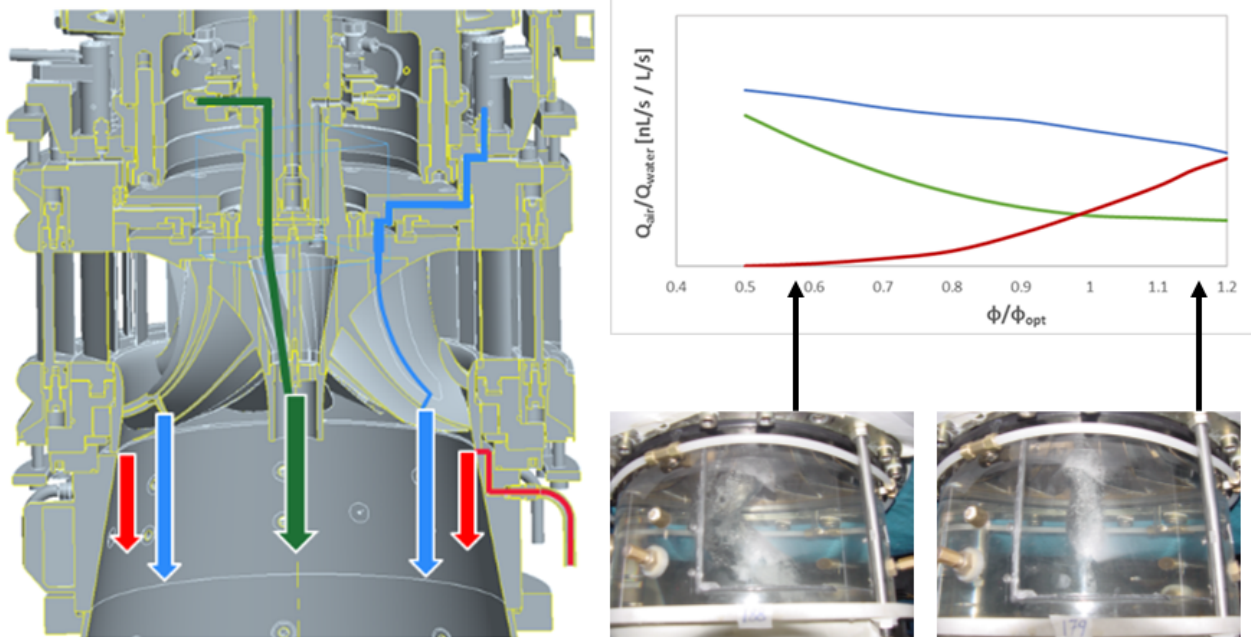


Grâce à l'accélération de l'eau à la roue, il y a des zones où la pression est inférieure à la pression atmosphérique. Typiquement, il y a trois zones qui peuvent être exploitées.

Sur la figure suivante, ces trois zones sont montrées, il y a l'aération :

- Centrale (par a pointe de roue) en vert
- Périphérique (par la ceinture et le cône aspirateur) en rouge
- Distribuée par la roue en bleu

On voit aussi sur le graphique que la qualité de l'aspiration varie avec le point de fonctionnement et que les trois types d'aération ne réagissent pas de la même manière.



En fonction de l'endroit d'introduction, la quantité d'oxygène introduit n'est pas la même

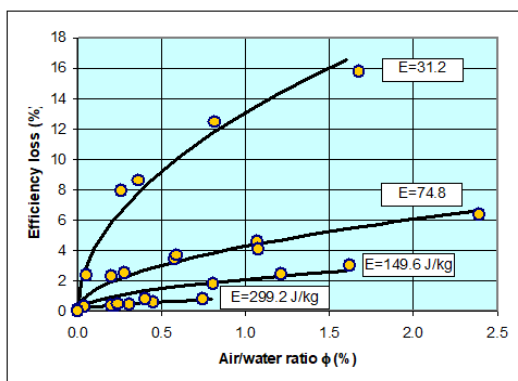
Effet de l'aération sur le rendement

Remarque

L'admission d'air en quantité significative affecte le fonctionnement de la turbine. Lors d'essais sur l'aération centrale on a observé une perte de rendement avec l'augmentation de la quantité d'air.

Cette variation de rendement peut trouver une explication dans les hypothèses suivantes :

- L'air injectée dans une zone de basse pression y augmente la pression et diminue ainsi la chute vue par la turbine, moins d'énergie lui est disponible.
- Cette diminution de la chute fait aussi que le point de fonctionnement glisse sur la colline (augmentation du n_{11}) de la roue, les angles fluides sont perturbés.
- La densité moyenne du fluide diminue.
- Le volume d'air perturbe le champ de vitesse de l'eau et modifie:
 - La quantité de mouvement à la sortie de la roue.
 - Le champ de vitesse à l'entrée aspirateur et donc le rendement de l'aspirateur.

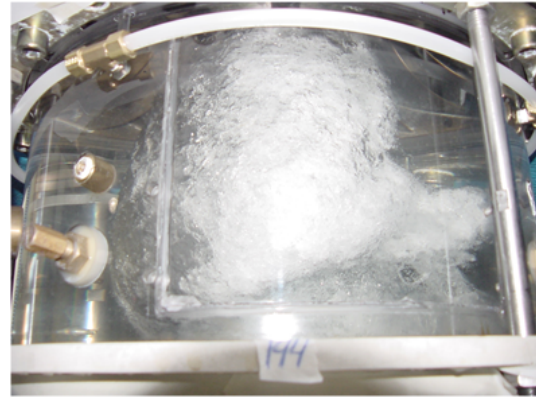


Essai modèle montrant la perte de rendement

On observe que pour ces essais $\Delta\eta \approx \phi^{0.5}$.

On comprend bien que la quantité d'air atmosphérique qui entre dans la turbine dépend de la pression absolue au point d'injection qui elle même dépend des conditions d'essai. Or, se pose la question comment transposer ces données au prototype ?

Comme pour les autres lois de similitudes, deux turbines vont être en similitude si leurs géométries solides et fluides le sont. Donc, c'est une affaire de géométrie. L'observation montre que l'air admis crée des structures à base de bulles plus ou moins agglomérées. L'hypothèse émise est que si l'on peut reproduire les mêmes structures à l'échelle, on sera au même point de fonctionnement et donc en similitude.



Modèle avec torche aérée

Les limites d'apparition de la torche

Pour une aération centrale, il y a introduction d'air lorsque la pression à p_4 est inférieure à la pression d'injection p_1 .

Sur une colline, lors d'une prise de charge, on observe une zone sans torche lorsque la vitesse tangentielle est insuffisante pour descendre la pression sous la tension de vapeur.

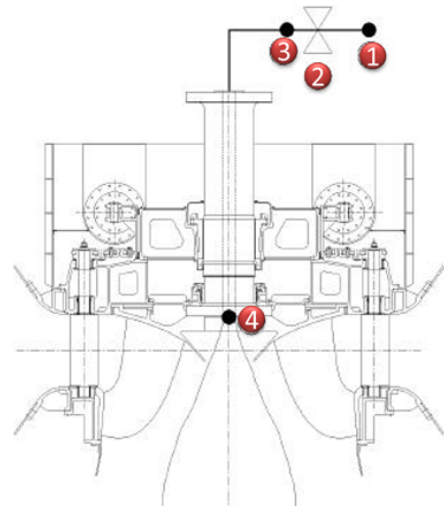
La similitude de Thoma combinée à la similitude de Froude assure la similitude en pression et en cavitation partout dans l'écoulement. On pousse l'hypothèse à ce que ces similitudes de Froude et Thoma assurent la similitude des structures de bulles.

Sur le graphique on présente les limites de l'apparition de la torche en fonction du débit et de la pression absolue.

Pour une pression absolue à la pointe de roue, point 4, inférieure à la tension de vapeur, il y a une torche qui se forme.

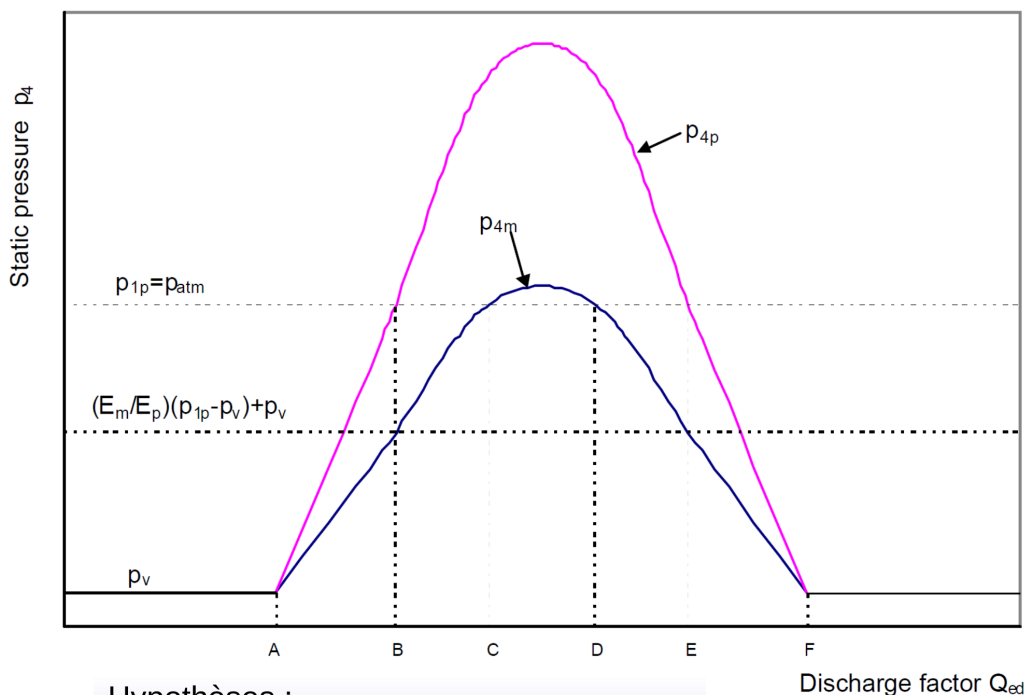
La rotation de l'écoulement est pratiquement nulle au point de meilleur rendement et varie en s'éloignant de ce point de sorte que la pression absolue se comporte à l'inverse et atteint un sommet près du débit de meilleur rendement. Le graphique illustre approximativement ce comportement.

- Dans le cas où $p_4 < p_v$, il y a une torche de vapeur.
- Dans le cas où $p_4 < p_1$, il y a une torche d'air.



Localisation des points d'entrée et d'injection d'air pour une aération centrale

Évolution de la pression p_4 en fonction du débit



Hypothèses :
 Essais conduits en similitude de Thoma et de Froude :

- Les pressions sont en similitude
- La cavitation est en similitude

Limites d'apparition de la torche avec et sans air

$$\sigma_p = \sigma_m$$

$$\frac{p_{absp} - p_{vp}}{\rho E_p} = \frac{p_{absm} - p_{vm}}{\rho E_m}$$

Pour le cas particulier du point 4, elle s'applique ainsi:

$$\frac{p_{4p} - p_{vp}}{\rho E_p} = \frac{p_{4m} - p_{vm}}{\rho E_m}$$

et donc

$$p_{4p} = \frac{E_p}{E_m} p_{4m} + p_v \left(1 - \frac{E_p}{E_m} \right)$$

En assumant qu'à peu de chose près, $p_4 = p_1$, et si $p_1 = p_{atm}$ sur modèle et sur prototype, cette dernière équation ne peut être vérifiée (sauf évidemment si le rapport d'échelle est 1 !!)

On note que :

- La pression au site d'injection p_4 contrôle le débit d'air qui alimente la torche.
- Le volume de la torche doit être homologue géométriquement sur modèle et sur proto quand il y a injection d'air.
- Le débit d'air dont dépend le volume de la torche devient donc le facteur à considérer.

Le débit d'air alimentant le volume de la torche est une fonction de:

- La dimension de l'interface air-eau S , car c'est par là que l'air va s'échapper dans l'écoulement.
- La vitesse de l'écoulement v .
- La pression interne dans la torche p_4 .

Ce qui s'exprime ainsi :

$$\rho_{air} Q_{air} = k S v^y p_{4 air}$$

où

k est un facteur de proportion

y est un facteur pour tenir compte des écarts expérimentaux à expliquer ...

(Théoriquement égal à 1.)

Il convient donc d'assurer l'homologie des débits massiques d'air. On impose donc la condition suivante sur les ratios de débit d'air :

$$\frac{\rho_{airp} Q_{airp}}{\rho_{airm} Q_{airm}} = \frac{S_p}{S_m} \left(\frac{v_p}{v_m} \right)^y \frac{p_{4 airp}}{p_{4 airm}}$$

où la proportion des surfaces et des vitesses peuvent s'exprimer aussi:

$$\frac{S_p}{S_m} = \left(\frac{D_p}{D_m} \right)^2 \text{ et } \frac{v_p}{v_m} = \left(\frac{E_p}{E_m} \right)^{1/2}$$

Sachant qu'en 4 la pression résulte de la pression de l'air et de la tension de vapeur:

$$p_{4 p} = \frac{E_p}{E_m} p_{4 m} + p_v \left(1 - \frac{E_p}{E_m} \right) \rightarrow p_{4 airp} + p_v = \frac{E_p}{E_m} (p_{4 airm} + p_v) + p_v \left(1 - \frac{E_p}{E_m} \right)$$

qui se simplifie en:

$$\frac{p_{4 airp}}{p_{4 airm}} = \frac{E_p}{E_m}$$

et on obtient:

$$\frac{\rho_{airp} Q_{airp}}{\rho_{airm} Q_{airm}} = \left(\frac{D_p}{D_m} \right)^2 \left(\frac{E_p}{E_m} \right)^{\left(\frac{y}{2} + 1 \right)}$$

par commodité exprimons le débit massique de l'air à la pression atmosphérique et considérons le ratio débit d'air sur le débit d'eau exprimé par

$$\varphi = \frac{Q_{atm}}{Q_{eau}}$$

sachant que:

$$Q_{ED} = \frac{Q_{eau}}{D^2 \sqrt{E}} \rightarrow Q_{eau} = Q_{ED} D^2 \sqrt{E}$$

et que $Q_{EDp} = Q_{EDm}$

on peut reformuler:

$$\frac{Q_{atmp}}{Q_{atmm}} = \left(\frac{D_p}{D_m} \right)^2 \left(\frac{E_p}{E_m} \right)^{\left(\frac{y}{2} + 1 \right)} \rightarrow \frac{Q_{atmp}}{Q_{atmm}} = \left(\frac{D_p}{D_m} \right)^2 \left(\frac{E_p}{E_m} \right)^{1/2} \left(\frac{E_p}{E_m} \right)^{\left(\frac{y}{2} + \frac{1}{2} \right)} \rightarrow \frac{Q_{atmp}}{Q_{atmm}} = \frac{Q_{eaup}}{Q_{eaum}} \left(\frac{E_p}{E_m} \right)^{\left(\frac{y+1}{2} \right)}$$

$$\frac{\varphi_p}{\varphi_m} = \left(\frac{E_p}{E_m} \right)^{\left(\frac{y+1}{2} \right)}$$

On observe donc que pour être en similitude le ratio des φ ne dépend que des chutes et que l'échelle des dimensions n'entre pas en jeux.

Considérant l'air comme un gaz idéal avec une constante R et admettant la même température d'air sur proto et modèle :

$$\frac{\rho_{airp} Q_{airp}}{\rho_{airm} Q_{airm}} = \frac{S_p}{S_m} \left(\frac{v_p}{v_m} \right)^y \frac{p_{4 airp}}{p_{4 airm}}$$

$$\rho_{air} = \frac{p_{4 air}}{RT_{air}}$$

$$\frac{Q_{airp}}{Q_{airm}} = \frac{S_p}{S_m} \left(\frac{v_p}{v_m} \right)^y$$

$$\frac{Q_{airp}}{Q_{airm}} = \left(\frac{D_p}{D_m} \right)^2 \left(\frac{E_p}{E_m} \right)^{\left(\frac{y}{2} \right)}$$

Quelques observations

? Exemple

L'aération centrale concentre l'air au centre alors que l'aération périphérique distribue plus l'air qui par l'accélération centripète se mélangera mieux à l'eau.

Ce qui veut dire qu'avec moins d'air on obtiendra un niveau d'oxygène dissout supérieur.

Moins d'air = moins de perte.

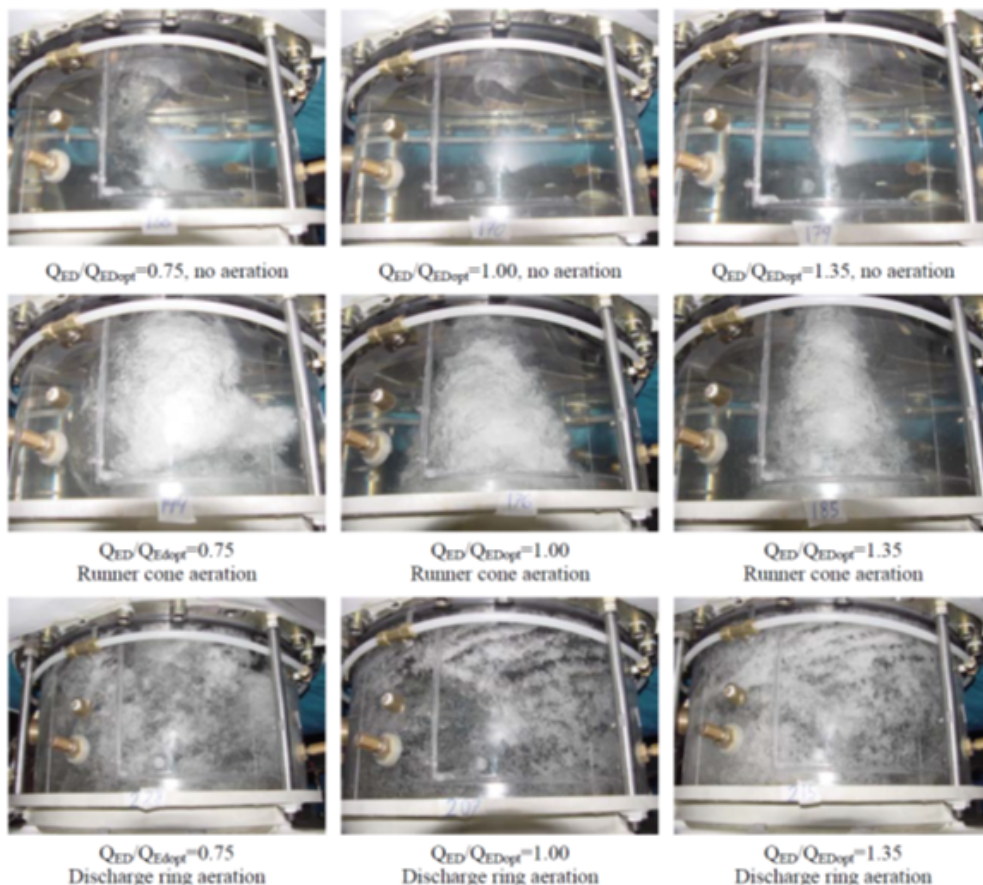
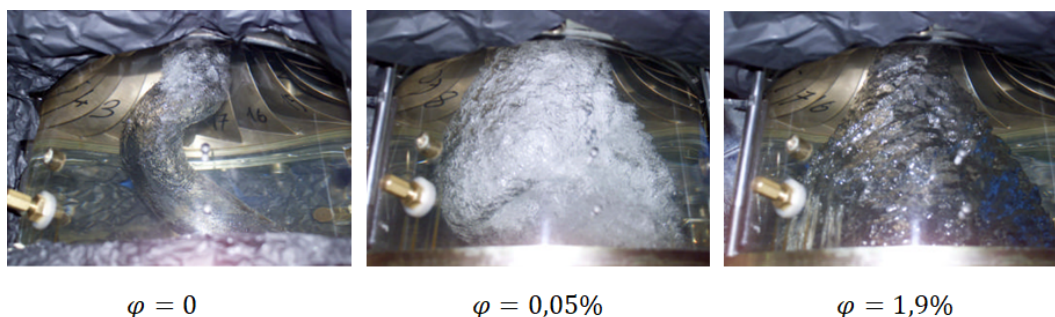


Fig. 3 Generated bubbles under the runner with cone aeration and peripheral air admission by the discharge ring for three operating conditions

Comparaison de 3 points de fonctionnement, faible, coeur et pleine charge dans aération, avec aération centrale et périphérique

Point d'opération identique, même ouverture des directrices et même chute d'essai.

Très peu d'air central influence la torche.



L'aération centrale est aussi utilisée pour atténuer le bruit et les fluctuations de pression avec très peu d'air

Vérification expérimentale de la loi de similitude



La figure ci-bas montre des variations de la torche pour un même point de fonctionnement mais sous des chutes différentes et des débits d'air différents.

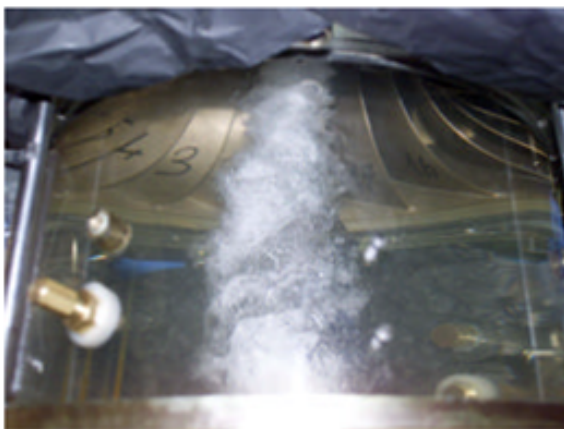
Pour une même débit d'air les figures a et b essayées sous des chutes différentes montrent des torches de volume très différents.

Pour a figure c, on a pris la moitié de la chute de a et on a fait varier la quantité d'air pour obtenir un volume de torche à peu près équivalente à l'oeil.

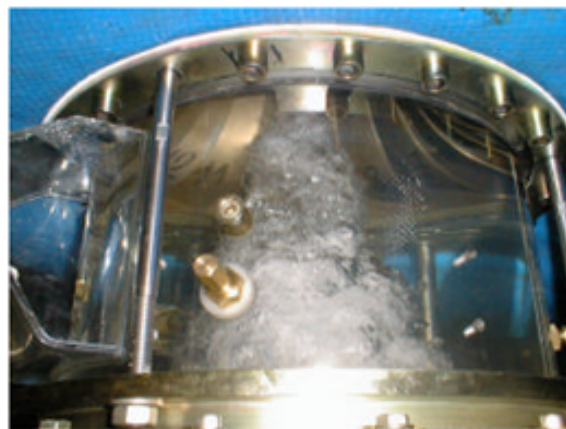
Avec les observations ainsi faite en appliquant la loi de similitude on obtient une valeur de $\gamma=2,25$:

$$\frac{\varphi_a}{\varphi_c} = \left(\frac{E_a}{E_c} \right)^{\left(\frac{\gamma+1}{2} \right)}$$

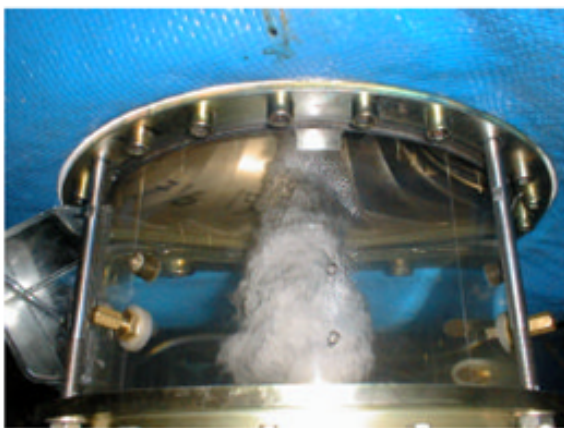
$$\frac{0,74}{0,24} = \left(\frac{300}{150} \right)^{\left(\frac{2,25+1}{2} \right)}$$



3a. E=299.2 J/kg, $\phi = 0.74\%$



3b. E=149.6 J/kg, $\phi = 0.8\%$



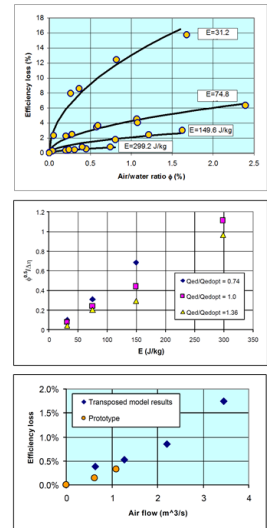
3c. E=149.6 J/kg, $\phi = 0.24\%$

Figure 3. Three images of the aerated vortex.

Observation du volume de la torche sous différentes chutes

Sur le graphique du haut, pour une même point de fonctionnement (nEDopt,QEDopt), $\gamma=3$ donne une bonne approximation pour des essais sur modèle avec une aération centrale.

Par exemple :



Validation et limite de la similitude

Sous 150 m à $\phi=1\%$
 on a la même perte de rendement qu'à
 $\phi=0,24\%$
 sous 75 m

$$\frac{\phi_{150}}{\phi_{75}} = \left(\frac{E_{150}}{E_{75}} \right)^{\left(\frac{\gamma+1}{2} \right)}$$

$$\frac{1}{0,24} = \left(\frac{150}{75} \right)^{\left(\frac{\gamma+1}{2} \right)}$$

$$\frac{\gamma+1}{2} = \frac{\log\left(\frac{1}{0,24}\right)}{\log\left(\frac{150}{75}\right)} = 2,05$$

$$\gamma = 3,11$$

Cela indique un écart par rapport à la valeur théorique $\gamma=1$ qui montre qu'une partie du phénomène échappe à notre théorie.

Sur le graphique du milieu, on observe que par rapport à la théorie où $\gamma=1$ l'écart croît lorsqu'on s'éloigne du point optimal.

Enfin sur le graphique du bas, on a comparé la théorie entre un modèle et son prototype et on y constate une bonne concordance.

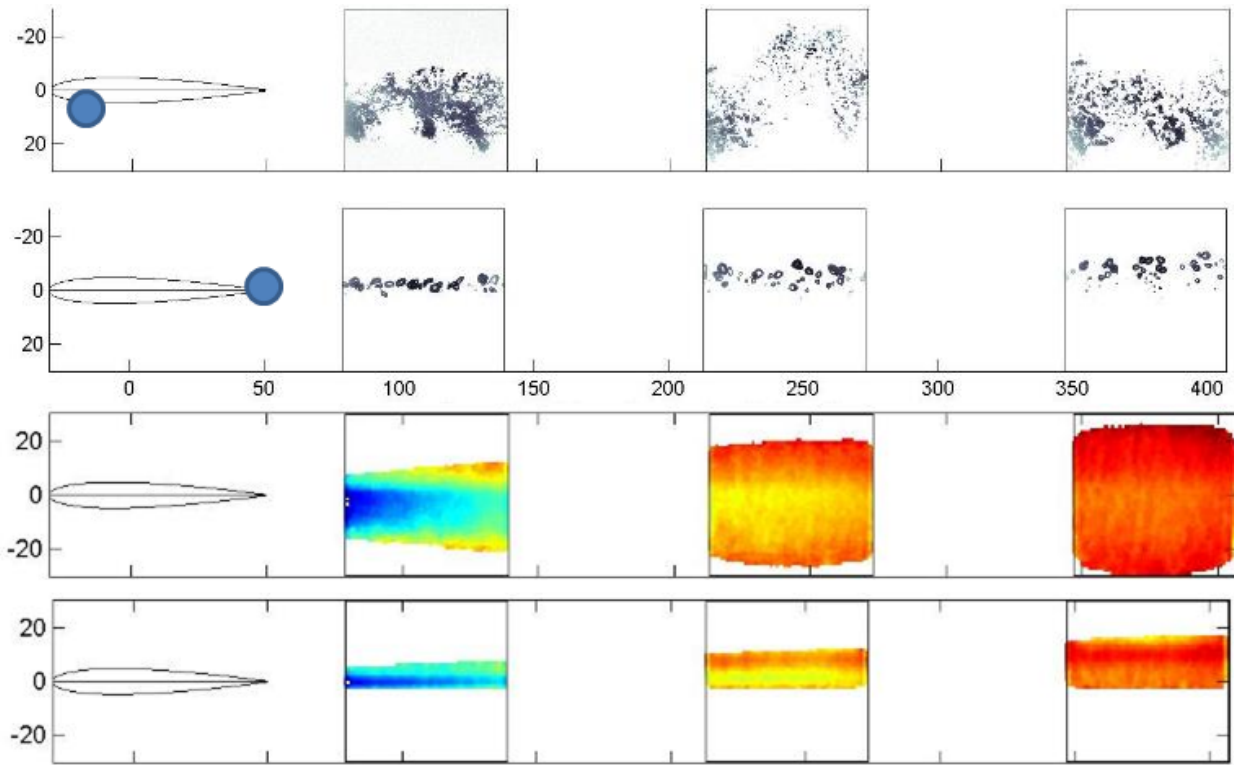
On doit observer que les comparaisons entre mesure et théorie à l'échelle modèle comme prototype sont assez limités et que l'on ne peut conclure avec certitude. La théorie développée est une base qui n'explique pas tout, certains phénomènes échappent à la compréhension et il faut pousser plus loin les investigations.

Piste de recherche pour l'aération distribuée



L'amélioration de la performance de la turbine va de pair avec une meilleure dissolution de l'oxygène. Des bulles plus petite et mieux distribuées dans l'écoulement vont dans le sens d'une meilleure dissolution. La dynamique entre la dissolution et la perturbation de l'écoulement n'a pas été étudiée jusqu'à maintenant de même la transposition de la population de bulle (dimension vs quantité) suit ses propres règles, il faudra probablement tenir compte de la tension superficielle.

Sur la figure suivante, une étude du point d'injection sur le profil montre qu'une injection près du bord d'attaque montre des bulles plus petites et plus dispersées qu'une injection au bord de fuite.

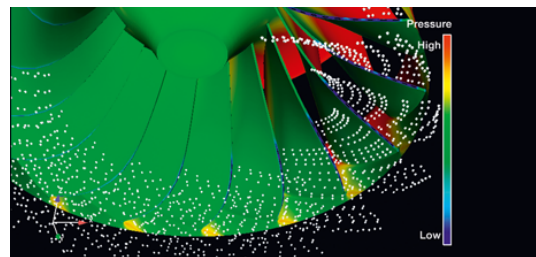


Pour une même quantité d'air une étude de la dispersion et de la dimension des bulles

Une méthode traditionnelle.

Une solution développée par Voith depuis 1985 est caractérisée par l'aération par le bord de fuite.

C'est une solution efficace en terme d'aération mais qui nécessite des bords de fuite épais qui intrinsèquement créent une traînée et des pertes.

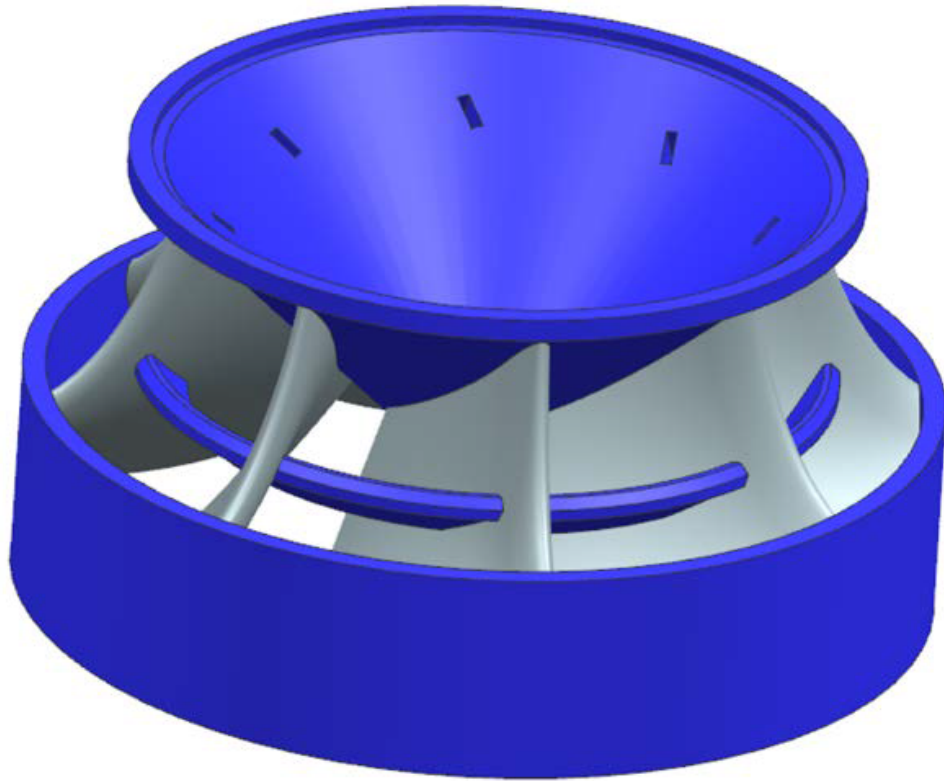


Aération par le bord de fuite des aubes

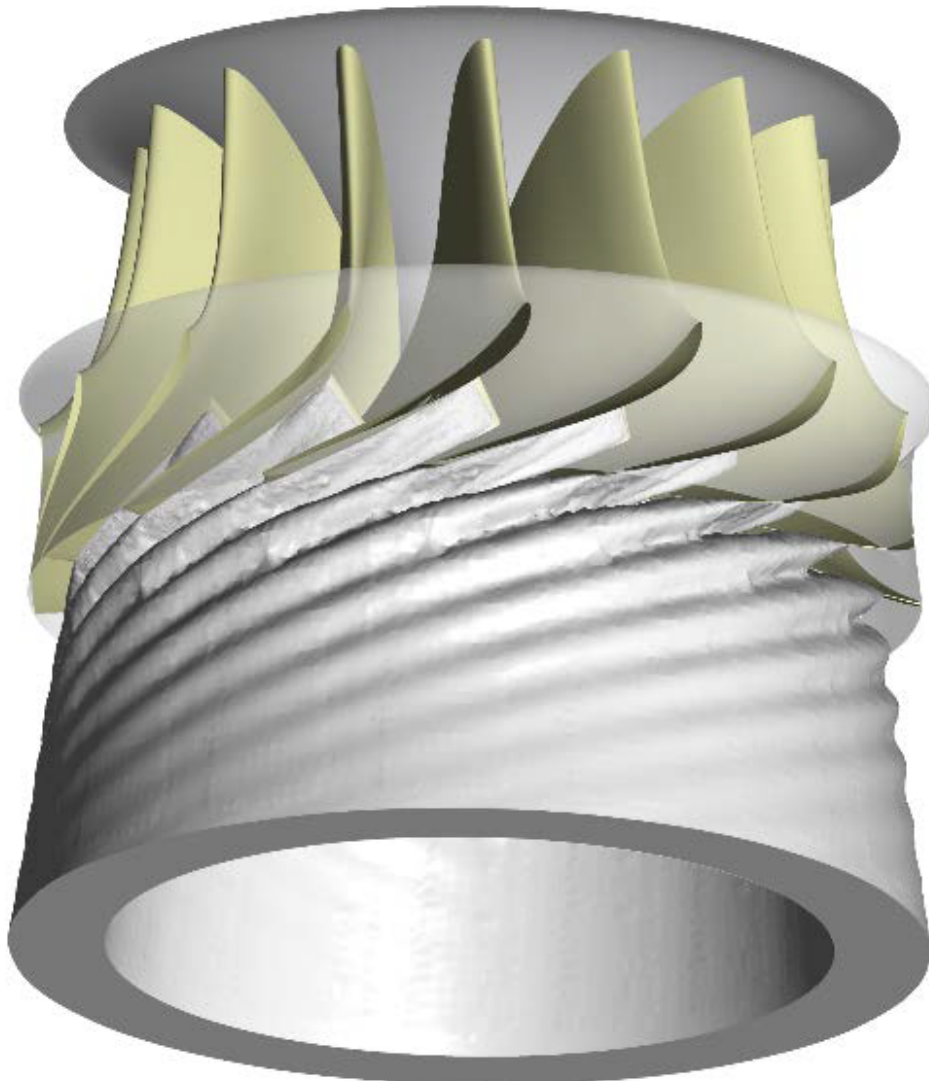
Une méthode améliorée.

La réponse à cette technologie a été développée par Alstom depuis 2002 puis GE et présentée en 2018 au congrès *HydroVision*. *Scott et al. (2018) p.27*

Elle s'appuie sur l'insertion d'un profil inter-aube qui introduit l'air dans l'écoulement par des trous situés près du bord d'attaque. Il en résulte des bulles plus petites et plus distribuées dans l'écoulement. Cela laisse espérer une quantité d'air introduite plus faible pour un même taux d'oxygène dans la rivière. De plus, ce profil s'insère dans le canal convergent des aubes et dispose d'un bord de fuite fin, de sorte que la traînée qu'il génère est très faible de même que la perturbation du champ de vitesse à la sortie des aubes. De ce fait, ce dispositif peut s'ajouter à tout tracé hydraulique sans avoir à le modifier.



Représentation schématique du dispositif d'aération de GE



Distribution de l'air introduit au bord d'attaque d'un profil inter-aube.

Une implantation remarquable de cette solution a été faite à High Roch Dam :

[cf. Résultat de l'implantation de la solution GE à High Roch]

5. Les turbines ichthyophiles



Pour des raisons évidentes de fonctionnement efficace, l'écoulement dans une turbine doit minimiser les chocs et les pertes. L'écoulement contourne donc les obstacles harmonieusement. Les poissons qui sont entraînés par l'écoulement ont une densité très voisine de celle de l'eau et donc se comportent à peu près identiquement.

Toutefois, ils ont des dimensions dont une longueur qui font que la géométrie de leur corps peut être soumise à des conditions hydrauliques différentes. On pense à la turbulence, aux chargements mécaniques dus aux contraintes, cisaillements et pressions. De plus, si leur dimension est significative par rapport aux passages hydrauliques, il y a des incompatibilités géométriques. Tous ces phénomènes peuvent désorienter, blesser et même tuer les poissons.

La mort des poissons dans les turbines devient préoccupante quand, dans le cycle de vie de l'espèce concernée, tous les poissons doivent monter et descendre obligatoirement la rivière et donc franchir les barrages. Ces espèces sont donc critiques. Il y a les poissons anadromes qui remontent les rivières pour se reproduire et les poissons catadromes qui retournent à la mer pour se reproduire. Les saumons, aloses et esturgeons sont anadromes et les anguilles catadromes. Ce sont ces espèces qui suscitent le plus de préoccupations.

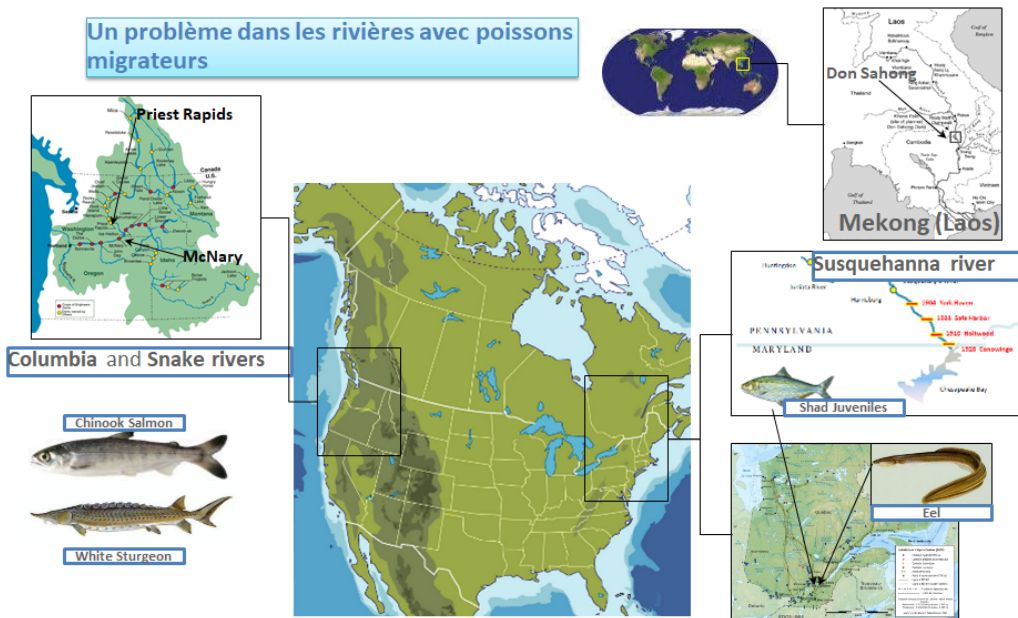
Pour la montaison, il y a des passages alternatifs qui permettent efficacement aux poissons de franchir le barrage. Ces installations sont donc construites en parallèle et n'affectent en rien les turbines. Là où les turbines peuvent être mises à contribution c'est lors de la dévalaison. En effet, pour franchir le barrage, la turbine présente un choix parfois incontournable, ce qui, essentiellement, justifie un travail d'optimisation.



Passage pour saumons adultes à la centrale de McNary

La préoccupation pour la survie des poissons ne date pas d'hier, les premières études en Europe datent de 1930 et dans les années 50 et suivantes plusieurs études ont été effectuées sur le bassin de la rivière Columbia dans l'ouest américain. En 1993, le US Department of Energy (DOE), avec l'Electric Power Research Institute (EPRI) et la Hydropower Research Foundation ont créé le programme "Advanced Hydropower Turbine System Program" qui a été dédié au développement d'une nouvelle turbine minimisant la mortalité des poissons.

Depuis, cette préoccupation a poursuivi son expansion mondiale et récemment on l'a observé dans le sud-est asiatique.

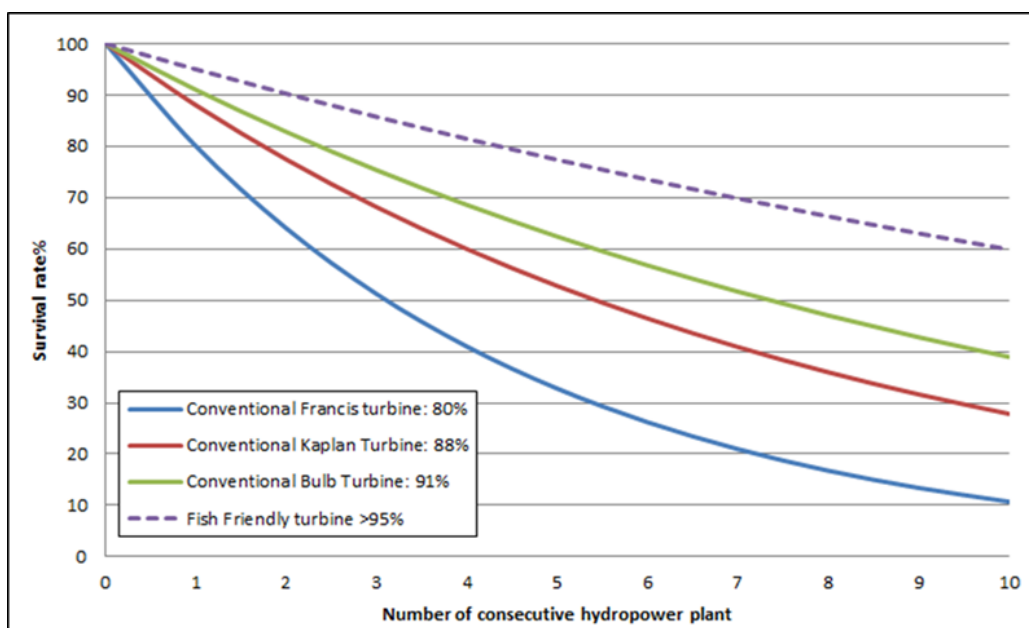


Les zones identifiées où la survie des poissons est préoccupantes

Les causes de mortalité



À la base le risque de mortalité est une probabilité qui augmente avec le nombre d'événements. Donc le nombre de barrages ou de turbines que les poissons doivent franchir pour retourner à l'océan affecte directement le taux de survie de la population. Pour illustrer ces probabilités ou plutôt le risque de mortalité, on a représenté sur les graphiques suivants des taux de survie représentatifs pour différents types de turbine en fonction du nombre de barrages franchis. On comprend aisément que les espèces migratrices soient beaucoup plus affectées que les autres.



Taux théorique de survie comparé en fonction du nombre de barrages franchis et du type de turbine.

Le risque de mortalité est présenté par rapport à l'absolu. De fait, si le milieu était naturel, le taux de survie ne serait pas 100%.

Les mécanismes de blessure



Dans une turbine, il y a plusieurs causes de blessure qui varient avec l'endroit considéré.

Il y a des causes **mécaniques** qui dépendent des parois solides, on pense :

- Aux chocs avec les parois fixes ou mobiles de la turbine.
- À l'abrasion par frottement avec ces parois.
- Au pincement ou extrusion lorsqu'un courant entraîne le poisson dans un espace où il ne peut passer.

Il y a aussi des causes **hydrauliques** liés au fluide :

- La pression qui varie dans l'espace et fluctue dans le temps.
- Les cisaillements.
- La turbulence qui peut par les tourbillons étourdir le poisson ce qui le désoriente et le rend victime des prédateurs.

Des études en laboratoire ont permis d'étudier méthodiquement ces mécanismes individuellement sur différentes espèces et dimensions de poisson.

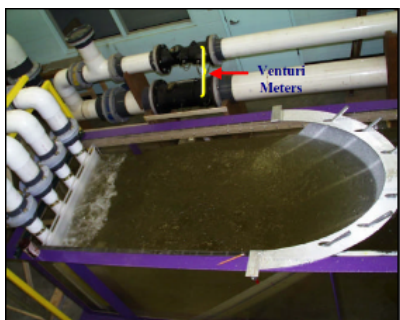
On peut trouver les études des chercheurs suivants :

- Turbulence : Odeh, et al 2002.
- Cisaillement : Neitzel, et al 2004.
- Chocs: Hecker, et al 2007.
- Pression : Brown, et al 2012.
- Abrasion : peu de référence.

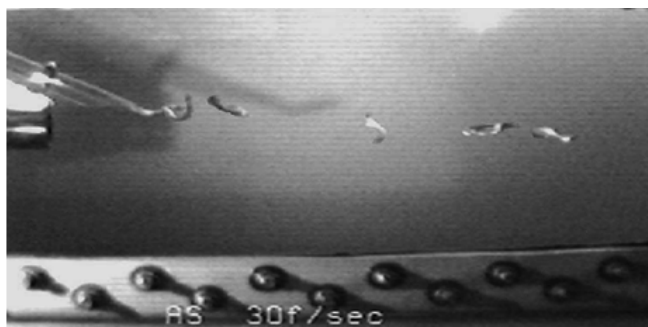
Le Pacific North West National Laboratory du Department of Energy est le plus actif présentement sur le sujet et conduit de vaste études autant en laboratoire qu'en rivière et dans les turbines. On leur doit :

- Tests en rivière très élaborés.
- Mesures en laboratoire.
- Simulations numériques.
- Mise à disposition d'un logiciel: le BIOPA.

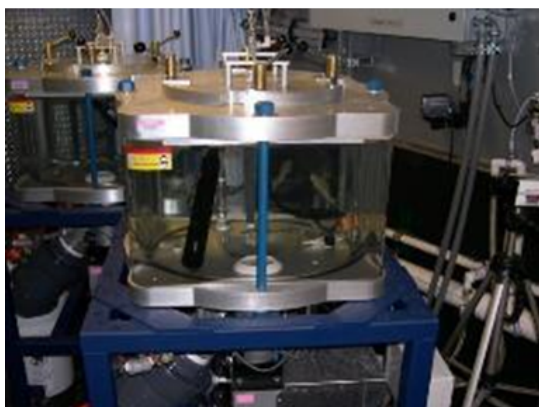
https://waterpower.pnnl.gov/hydropower/fish_passage.asp



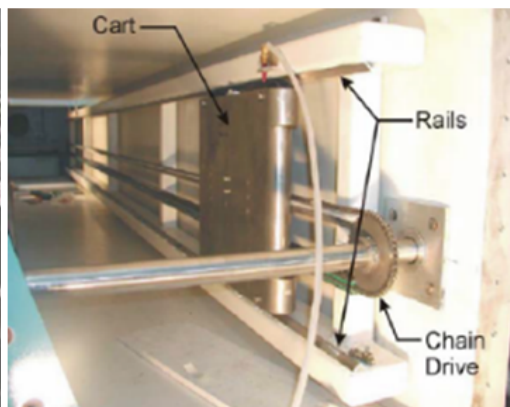
Turbulence



Cisaillement

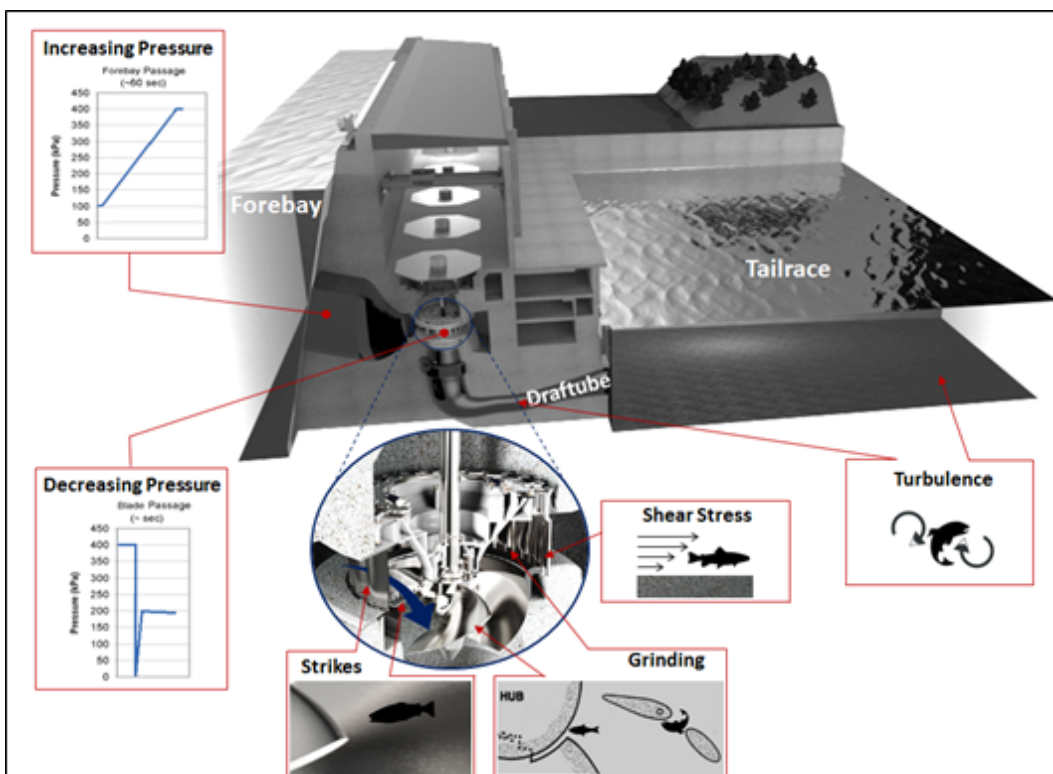


Pression



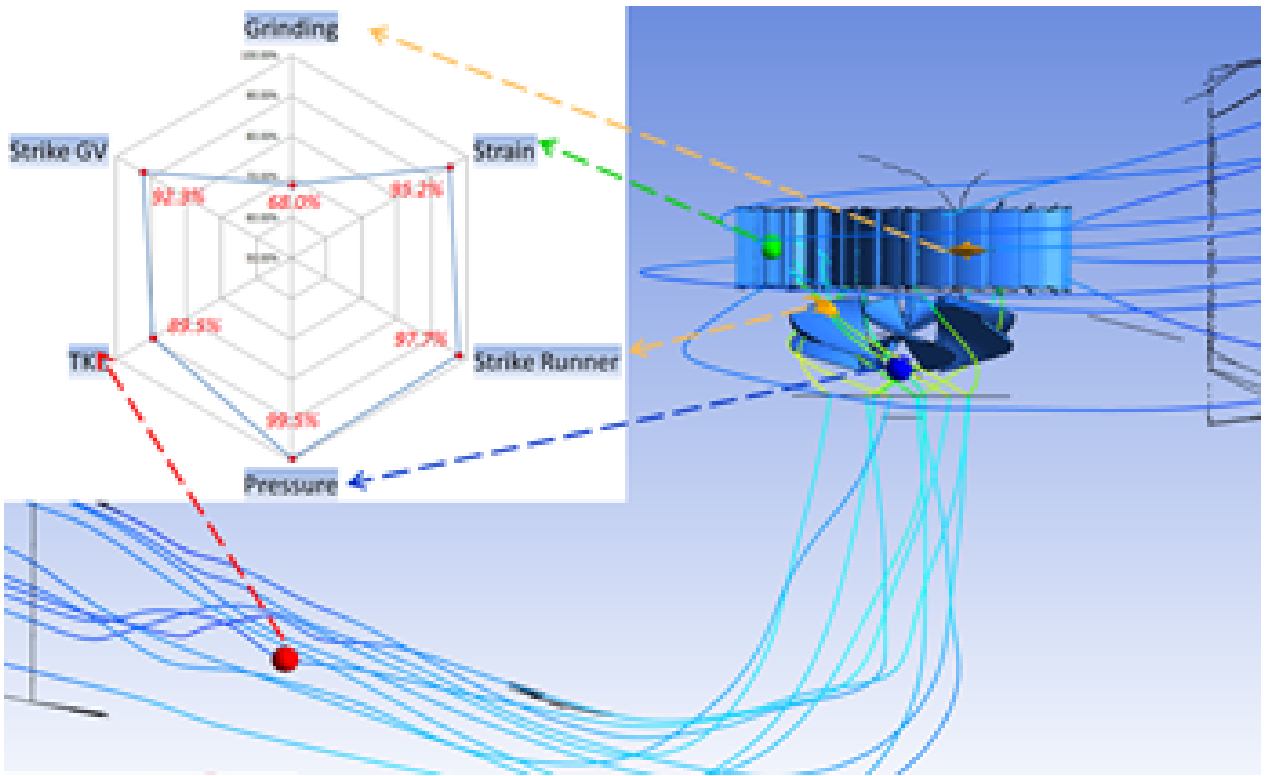
Chocs

Études des mécanismes de blessures en laboratoire résultant de plusieurs années de recherche



Localisation des dangers de blessures dans une turbine

Ce dernier point, le logiciel BioPa, est une innovation remarquable dans l'avancement des turbines ichtyophiles (fish friendly). Ce logiciel récupère la solution d'une simulation numérique CFD pour l'analyser et simuler le passage des poissons dans la turbine. Ensuite, il analyse les différents mécanismes de blessure et leur assigne une probabilité. Il en résulte un résidu à optimiser.



Analyse par logiciel des mécanismes de blessure, localisation et identification des causes

La formulation probabiliste des blessures



Le chiffrage des sources de danger identifiées est un sujet de recherche en constante évolution. Aussi, il peut varier avec les espèces et la dimension du sujet.

La **variation de la pression** est une des causes importantes de blessures. Sur le graphique suivant sont représentés les principaux paramètres qui influencent le taux de survie :

- La pression d'adaptation, P_A .
- La pression la plus basse, aussi appelée nadir P_N .
- Le taux de variation de la pression, R_p .

Les études de *Cada et al. (1997)*^{Cada et al. (1997) p.27} ont démontré que le ratio P_N/P_A a un effet important sur la survie des poissons et l'a mené à recommander un $P_N/P_A > 0,6$ pour s'assurer de la survie des poissons.

Pour le taux de variation de la pression *Odeh et al. (1999)*^{Odeh et al. (1999) p.27} suggère une limite à 550 kPa/s en général alors que *Becker et al. (2003)*^{Becker et al. (2003) p.27} tolère jusqu'à 3500 kPa/s pour les cas limités à de petites zones.

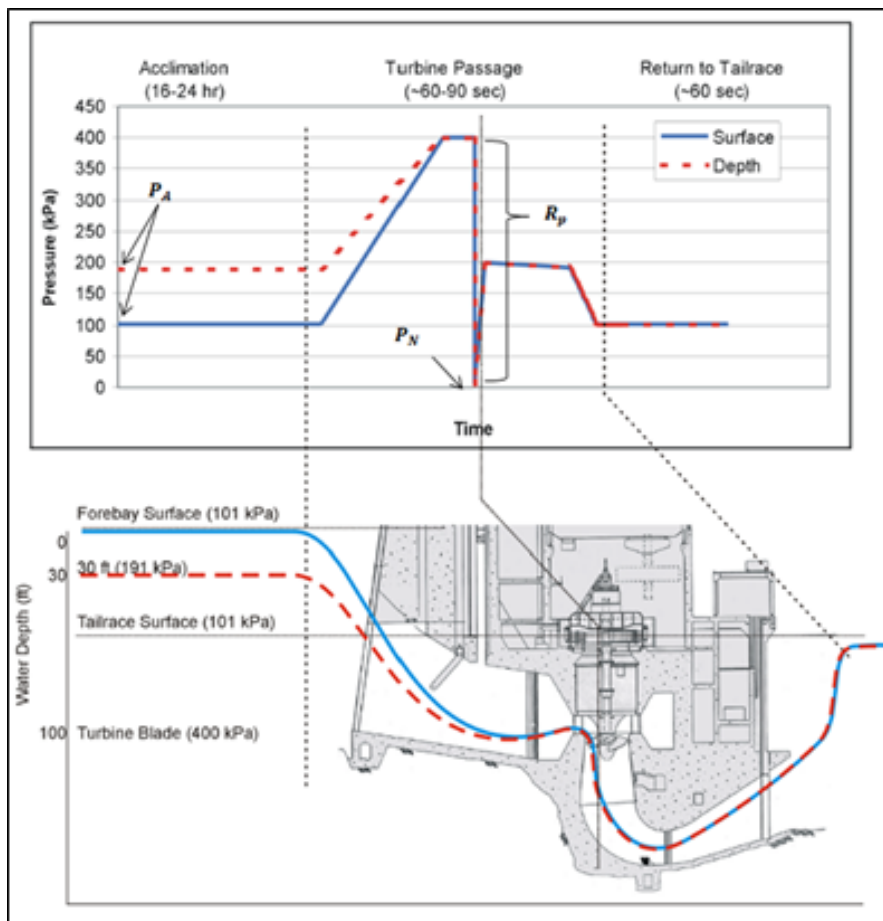
L'étude de *Brown (2012)*^{Brown (2012) p.27} sur les saumons Chinook juvéniles a confirmé l'importance du facteur P_N/P_A et a présenté une équation pour le taux de survie :

$$Survie_{Pression} = 1 - \frac{e^{(-5.56 + 3.85LRP)}}{1 + e^{(-5.56 + 3.85LRP)}}$$

où

$$LRP = \ln \frac{P_A}{P_N}$$

La pression minimale P_N ne doit pas dépasser une valeur de 69 à 82,7 kPa selon *Foust et al. (2013)*^{Foust et al. (2013) p.27}.



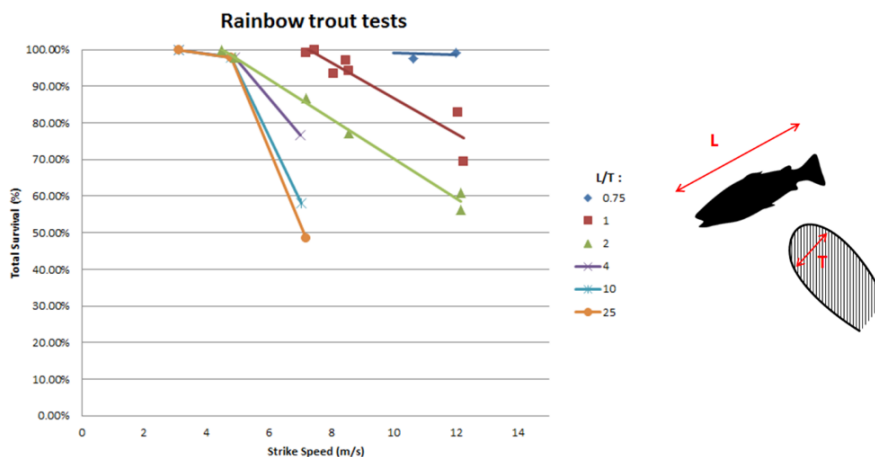
Évolution des pressions dans une turbine

Une autre cause de mortalité est l'**impact** des poissons avec les parois solides de la turbine. Déjà en 1999, Pavlov et al. a démontré une relation directe entre la vitesse relative du poisson (V) au point d'impact et ses chances de survie. Un choc à 5 m/s cause très peu de dommage alors qu'un autre à 25 m/s est létal. Plus récemment, Amaral et al. (2010)^{Amaral et al. (2010) p.27} a identifié le ratio longueur du poisson (L) sur l'épaisseur de la pale (T) comme ayant une influence sur le taux de survie. Évidemment, la roue présente le risque le plus élevé à cause de la vitesse relative de l'écoulement qui est plus importante que partout ailleurs dans la turbine.

Pour toute collision, le taux de survie à l'impact peut s'exprimer comme une fonction :

$$Survie_{Impact} = f\left(\frac{L}{T}, V\right)$$

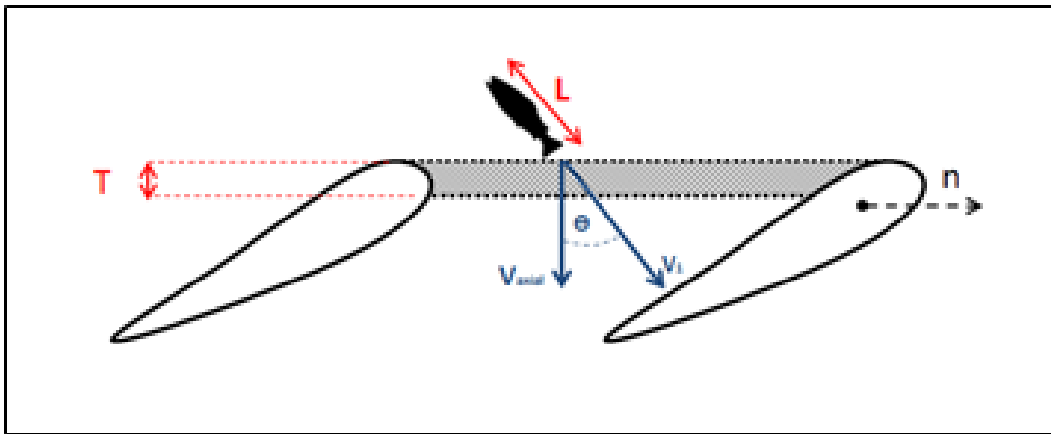
À partir du graphique suivant on peut déduire qu'en limitant les risques de collisions, par exemple en diminuant le nombre de pale, et en maintenant si possible les vitesses d'écoulement en bas de 5 m/s on augmente le taux de survie.



Taux de survie à l'impact

Le point le plus critique est le bord d'attaque des pales. En effet, juste du point de vue géométrique le passage entre 2 pales représente une contrainte que doit franchir le poisson. On identifie les variables suivantes :

- t_c le temps de passage entre 2 pales pour une roue en rotation
- t_f le temps pour le poisson pour s'insérer entre 2 pales



Un modèle de collision

On peut donc élaborer le modèle de probabilité de survie à une collision avec un bord d'attaque d'une pale de roue suivant :

$$\text{Taux d'impact} = \frac{t_f}{t_c}$$

où

$$t_c = \frac{1}{\frac{nN}{60}}$$

avec:

n la vitesse de rotation en tpm et N le nombre de pales

et

$$t_f = \frac{L \cos \theta}{V_{axial}} + \frac{T}{V_{axial}}$$

$$\text{Taux d'impact} = \frac{nN}{60} * \left(\frac{L \cos \theta}{V_{axial}} + \frac{T}{V_{axial}} \right)$$

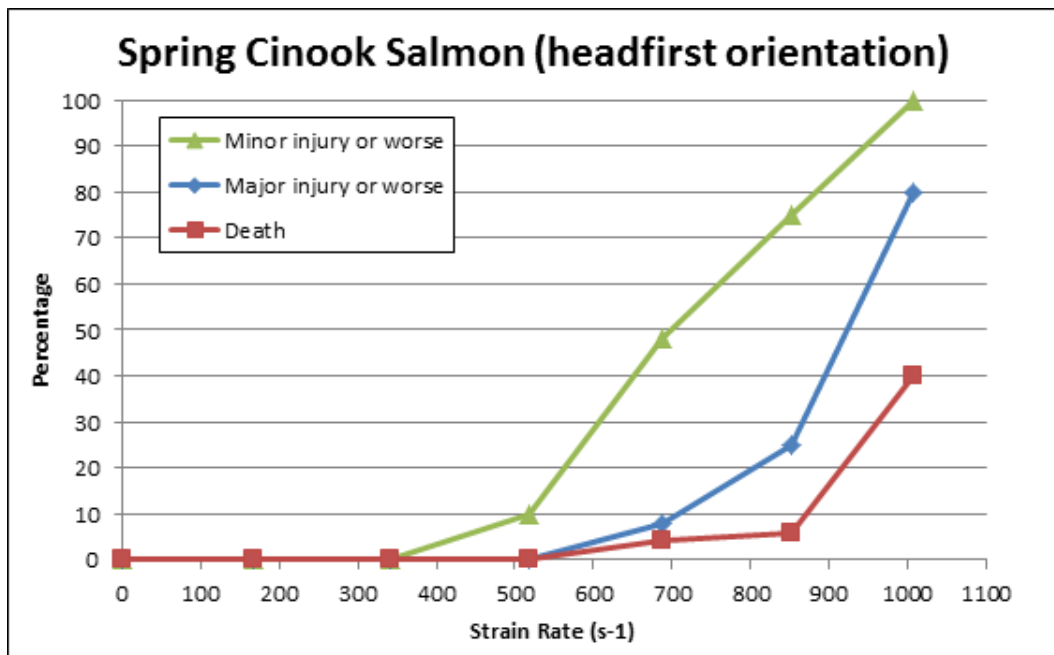
$$\text{Survie}_{\text{Impact}} = 1 - \text{Taux d'impact} * f\left(\frac{L}{T}, V\right)$$

On observe aussi des blessures chez les poissons causées par **l'abrasion**. Il s'agit du frottement du poisson contre la paroi qui cause des blessure aux nageoires et aux écailles. Il y a peu d'études publiées sur ce sujet.

Quant au **pincement**, Cada et al. (1997) Cada et al. (1997) p.27 a suggéré de réduire les jeux à moins de 2 mm. Ainsi avec ce jeu réduit on évite de coincer les poissons et de les blesser.

Le **cisaillement** du aux différences de vitesse entre deux courants voisins est aussi une cause de blessure. Il s'exprime comme le gradient de vitesse :

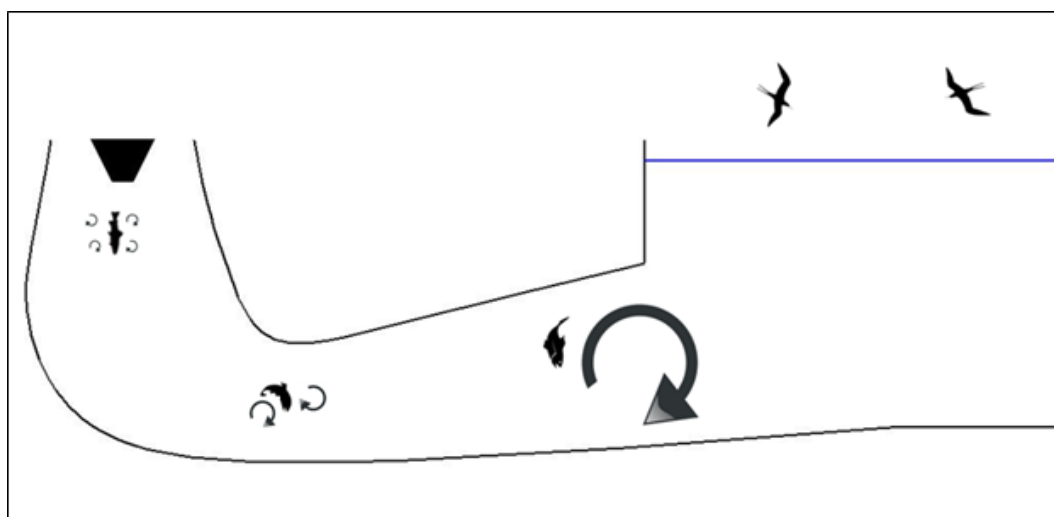
$e = \left| \frac{du}{dy} \right|$ avec comme unité 1/s. L'étude en laboratoire de Nietzl et Cada en 2000 illustre le potentiel de danger du cisaillement.



Effet du cisaillement sur la mortalité des poissons mesuré en laboratoire

On y observe qu'en bas de 350 s⁻¹ le risque est nul. Toutefois, on doit éliminer de ces considérations les effets de couche limite où on peut atteindre 3500 s⁻¹ car le volume affecté est trop près de la paroi (moins de 3-4 mm).

Enfin, une dernière cause de blessure est la **turbulence**. L'écoulement dans une turbine est hautement turbulent et ce phénomène couvre une large plage de grandeur de tourbillons. Dans les petites dimensions, les tourbillons imposent des contraintes mécaniques sur le poisson causent des déformation de son corps alors que les grands tourbillons le font tourner à haute vitesse ce qui tend à le désorienter et à le rendre susceptible à la prédation. La figure suivante illustre les phénomènes.



Effet de la turbulence et dimension des tourbillons dans la turbine

Odeh et al. (2002) statue que la cisaillement turbulent peut être utilisé pour quantifié le niveau de dommage causé au poisson. Cette valeur à 50N/m² évite la plupart de la mortalité indirecte par prédation. Au niveau de la conception une valeur de 35 N/m² est préconisée ce qui correspond à ne énergie turbulent $k= 3,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Détection des événements détritmentaux



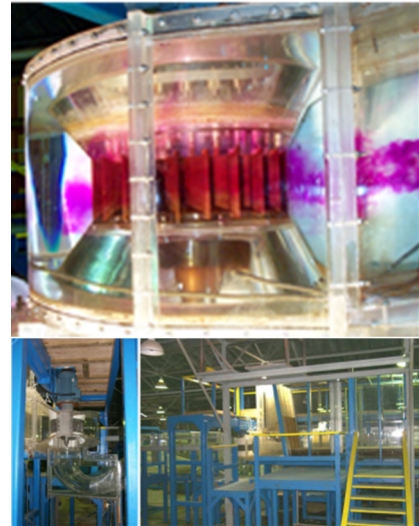
Différents outils peuvent être utilisés pour détecter et quantifier les événements dangereux pour les poissons.

Du point de vue expérimental le PNNL a conduit plusieurs campagnes de mesure dans les rivières et les turbines avec des poissons vivants instrumentés lâchés dans les rivières et des détecteurs embarqués dans des dispositifs simulant le poisson. Ces détecteurs étant lâchés à différentes altitude à l'entrée de la turbine. Ces données ajoutées aux essais en laboratoires documentent certaines variables physiques et les comportement des poissons.

Pour la conception de la machine, toutefois, les mesures effectués sur des **modèles réduits** et transparents au laboratoire du USACE à Vicksburg est une méthode comparative très éloquent pour qualifier la turbulence et les impacts.

On y conduit des essais axés sur la visualisation des écoulements

- Essai sous la chute de Froude
- Traceur à l'encre
- Poissons simulés par des petites pièces de plastique à flottaison nulle.
- Essais comparatifs de différentes conceptions et arrangements



Photos prises au laboratoire de Vicksburg

Plus intensément utilisé est la CFD couplé avec un analyseur d'événement comme le BioPa du PNNL. On y évalue de façon quantitative les différents dangers et on obtient un chiffre indicatif du taux de survie pour l'ensemble des événements se produisant dans la turbine. Ces dangers sont localisés, ce qui permet de modifier localement la géométrie afin de les réduire.

<https://waterpower.pnnl.gov/hydropower/technologiesproducts.asp>

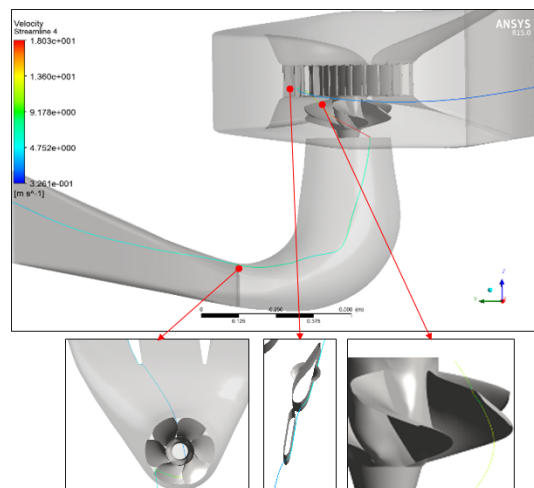
¹<https://availabletechnologies.pnnl.gov/technology.asp?id=373>

Choc:

- Détecté par la courbure 3D locale de la trajectoire.

Occurrence:

- Bord d'attaque des avant-directrices et directrices
- Bord d'attaque de la roue
- Nez de pile de l'aspirateur
- Profil en périphérie à cause du tourbillon des fuites marginales

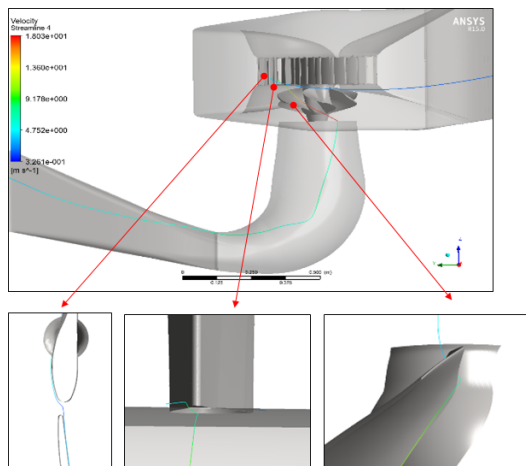


Analyse et localisation des collision par CFD

¹<https://waterpower.pnnl.gov/hydropower/technologiesproducts.asp>

Vérification si l'écoulement croise:

- Des jeux étroits
- Des surplombs de directrices



Analyse et localisation des coincements et abrasions par CFD

Les solutions favorisant la survie des poissons

? Exemple

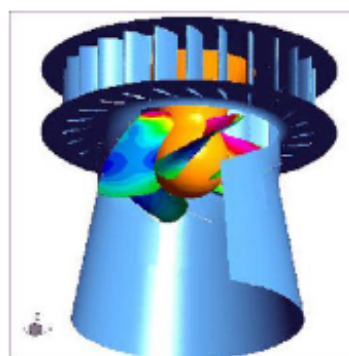
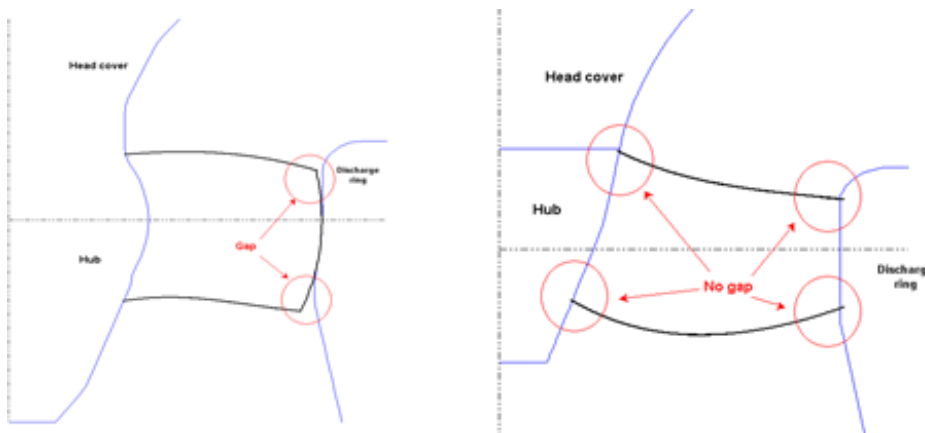
Voici quelques exemples de solutions technologiques favorisant la survie des poissons.

La roue à jeu minimal (MGR)

Il s'agit d'éliminer les sources de coincement et de cisaillement pour les poissons. C'est souvent une exigence des contrats où il y a des poissons migrateurs.

C'est que les roues de type Kaplan ont des pales qui pivotent et dans leur course extrême, il se crée un jeu en forme de coin entre la pale et le moyeu. La roue MGR limite ce jeu à environ 2 mm.

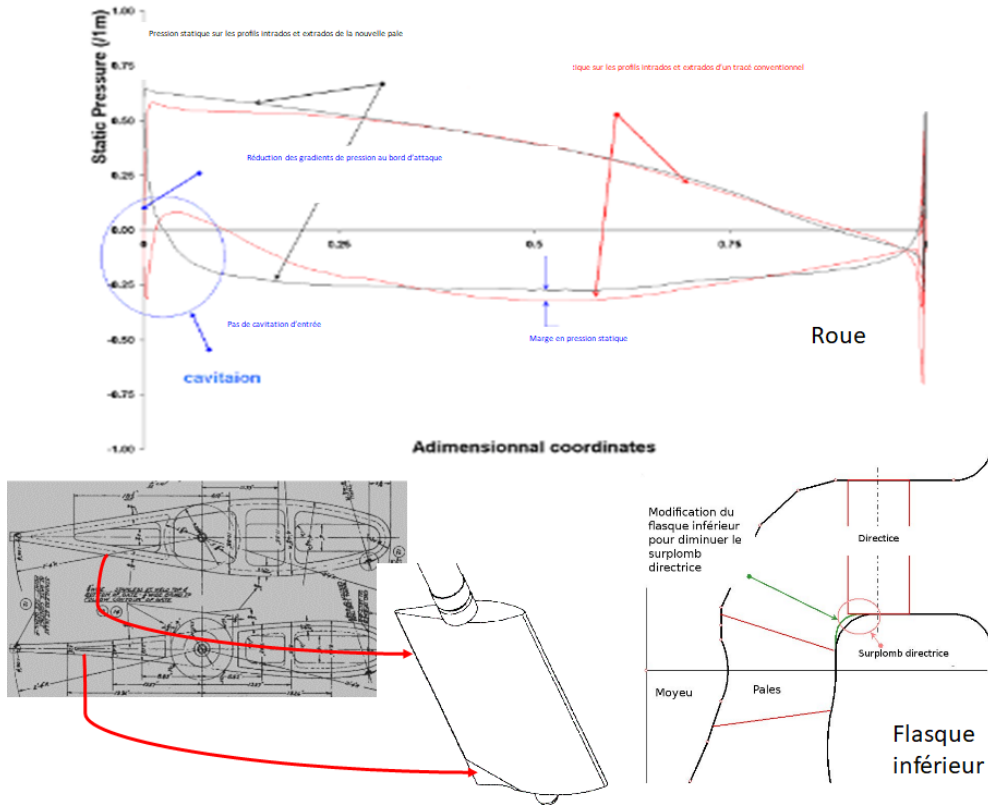
On pourrait considérer le remplacement d'une Kaplan par une hélice qui a naturellement cette particularité.



La roue Kaplan à jeu minimal

La maîtrise des accélérations et décélérations dans l'écoulement.

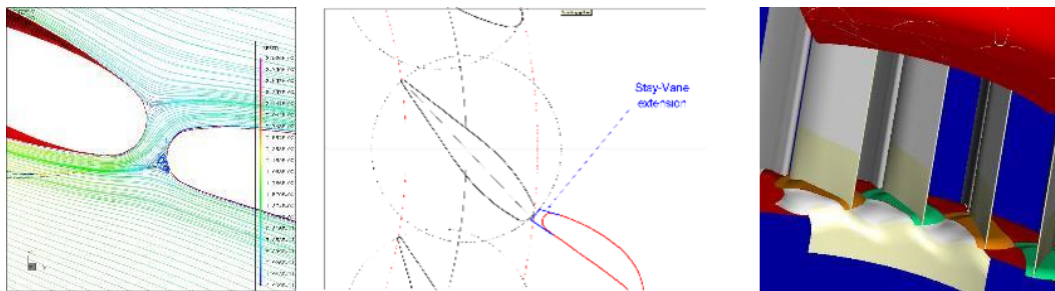
En limitant les expansions brusques, les accélérations violentes à la rencontre de bords aigus et en augmentant les rayons de courbure on contribue à diminuer les gradients de pressions, la cavitation, la turbulence, l'abrasion et d'autres effets nuisibles.



La diminution des accélérations est favorable sur plusieurs aspects

La maîtrise des jeux aux directrices

En rapprochant les directrices des avant-directrices on limite les débits qui peuvent entraîner les poissons et les coincer. Les flasques usinés en 5 axes permettent de limiter le jeu du au surplomb des directrices.



Le voisinage des directrices présentent des pièges pour les poissons

Observations sur les solutions itchthyophiles

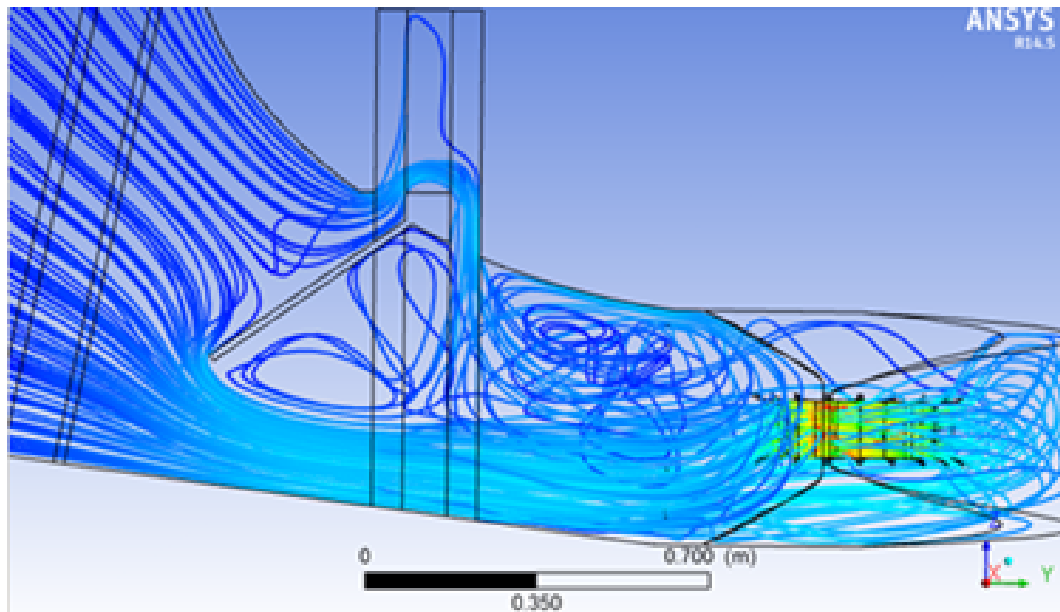


En plus d'augmenter le taux de survie des poissons, les solutions qui modifient les composantes de la turbines tendent à :

- Augmenter les rendement.
- Diminuer la cavitation.
- Augmenter les coûts des équipements.

Il faut noter qu'il existe une solution utilisant une grille à poisson qui a pour rôle de dévier les poissons vers une passe qui les amène à l'aval de la turbine sans la traverser.

Cette solution est très coûteuse énergétiquement et elle crée de la turbulence et des cisaillements importants qui sont nuisibles aux poissons qui l'ont évitée.



La grille à poisson perturbe de façon considérable les écoulements, réduit les performances et crée de la nuisance additionnelle pour les poissons qui ne sont pas capturés