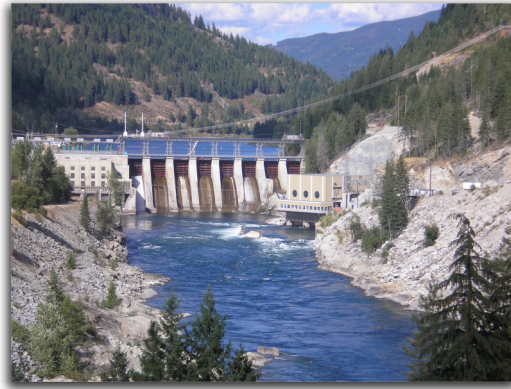


# ENR811 Hydraulique et hydroélectricité - Les enjeux du développement durable

© Michel Sabourin 2021

2 novembre 2021



*ENR811 Énergie hydraulique*

# Table des matières

<b>Objectifs</b>	<b>3</b>
<b>I - Hydraulique et hydroélectricité - Les enjeux du développement durable</b>	<b>4</b>
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'énergie .....	11
5. Emprises sur la biosphère .....	13
6. Consommation de matériaux .....	20
<b>II - Exercice : Exercices</b>	<b>22</b>
<b>Solutions des exercices</b>	<b>24</b>
<b>Glossaire</b>	<b>26</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>27</b>
<b>Webographie</b>	<b>28</b>
<b>Index</b>	<b>29</b>
<b>Crédits des ressources</b>	<b>30</b>

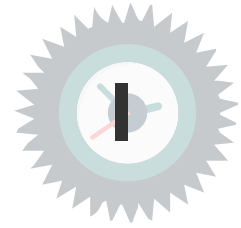
# Objectifs

---



- 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 suivants en ressources :

- 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, mortalités, 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, la flore et l'humanité,
  - 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.
  - des vies humaines : des blessures, mortalités, accidents.

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, mortalités, accidents,
- de coûts de maintenance.

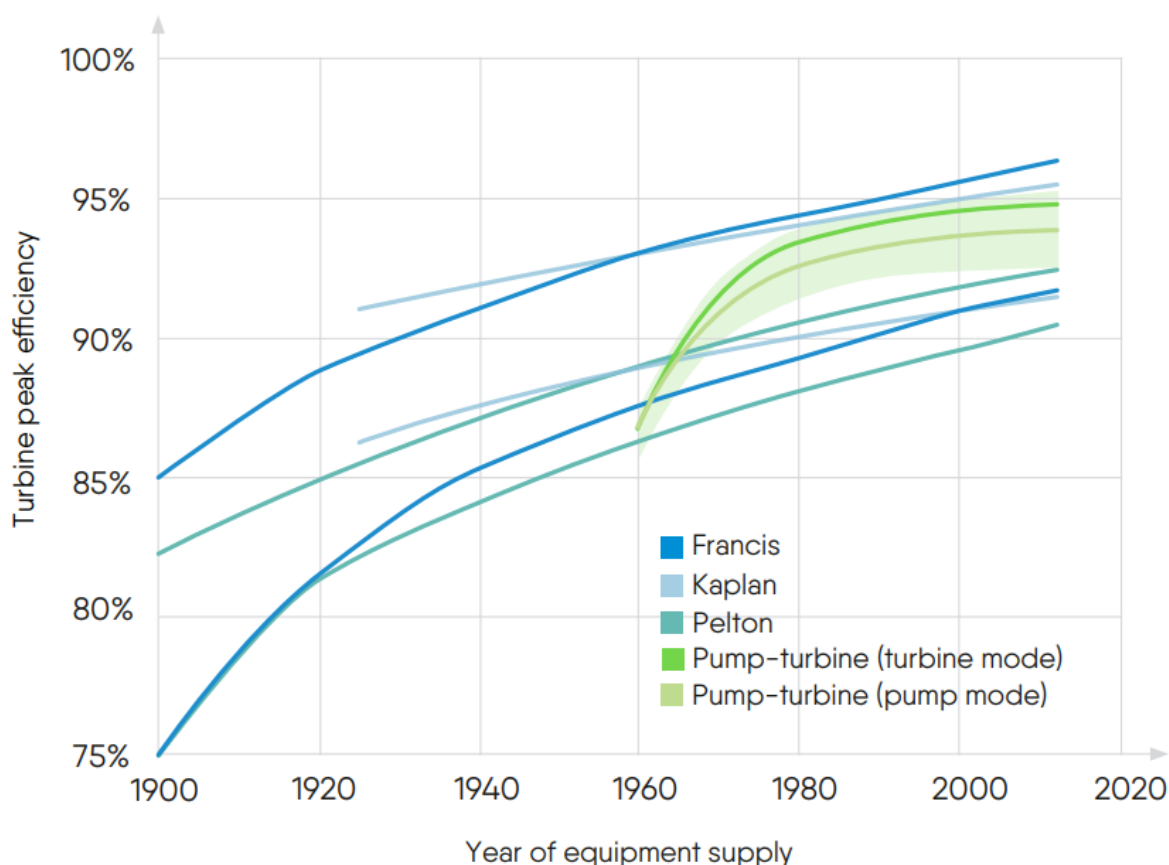
Il devient donc très intéressant d'en maximiser l'efficacité. On obtient ainsi plus d'énergie sans accroître les méfaits sur l'environnement.

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'ajoutent 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%<sup>T&D losses in USA p.28</sup>.

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

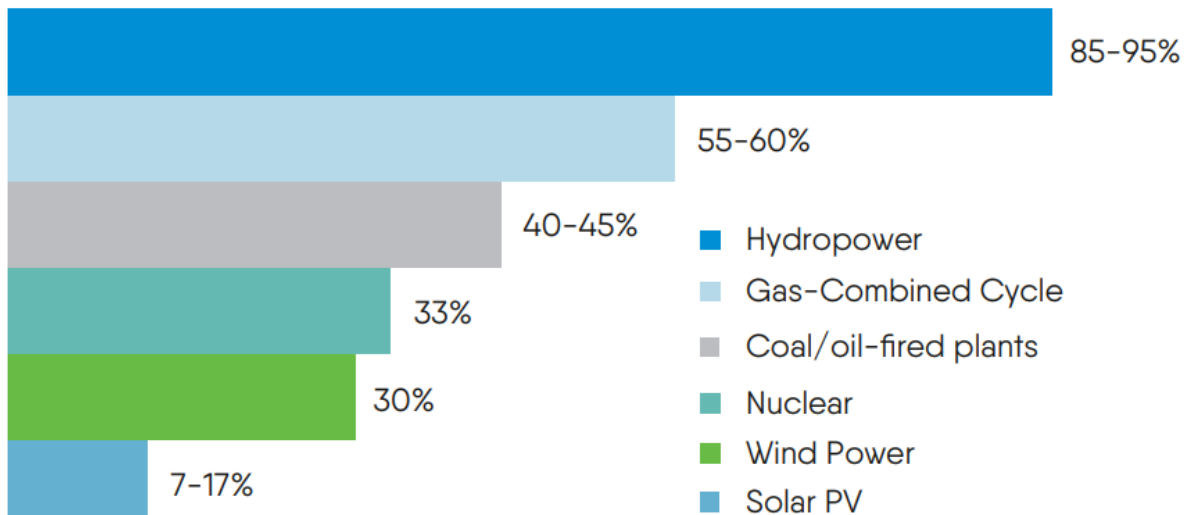
Dans le graphique suivant on montre l'évolution de l'efficacité des turbines au fil du temps. L'avènement des solutions numériques pour la conception et la fabrication explique en grande partie cette croissance des performances. Certaines solutions sont présentées ici<sup>1</sup>.



Évolution dans le temps des rendements des turbines hydrauliques

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

<sup>1</sup> [https://michelsabourin.scenari-community.org/SimTurbTech/co/1\\_1Amelioration\\_des\\_performances.html](https://michelsabourin.scenari-community.org/SimTurbTech/co/1_1Amelioration_des_performances.html)



Efficacité des différentes sources d'énergie

## 2. Le taux de retour énergétique

La mise-en-œuvre d'un projet énergétique et son exploitation consomment de l'énergie. Pendant le cycle de vie prévue, la production énergétique du projet est comparée à l'énergie consommée. Ainsi cette contribution, exprimée comme un ratio, s'il est supérieur à 1 permet au projet d'être considéré comme une source d'énergie.



### Définition

Le *taux de retour énergétique* <sup>Wikipedia - Taux de retour énergétique p.28</sup> (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)

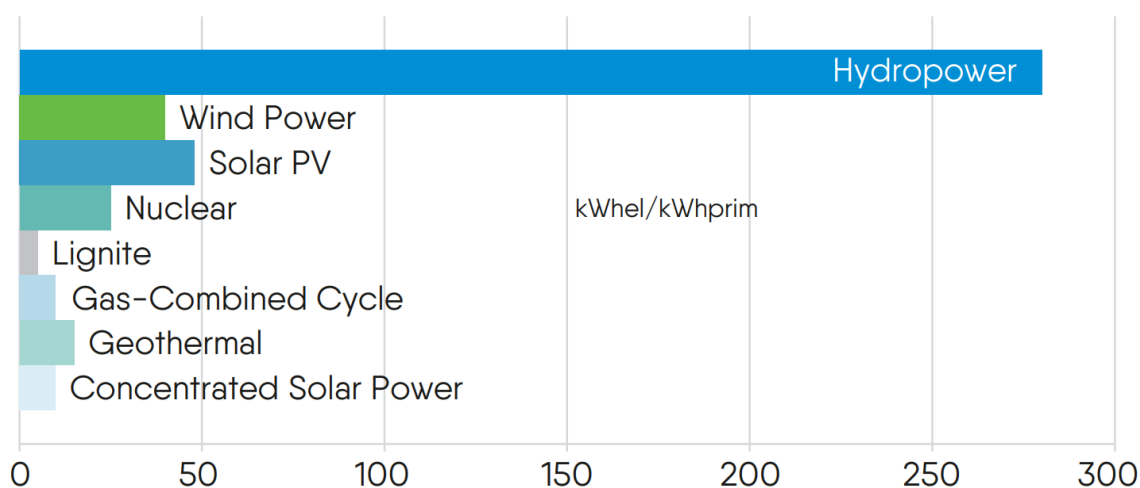


### Fondamental

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



*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.

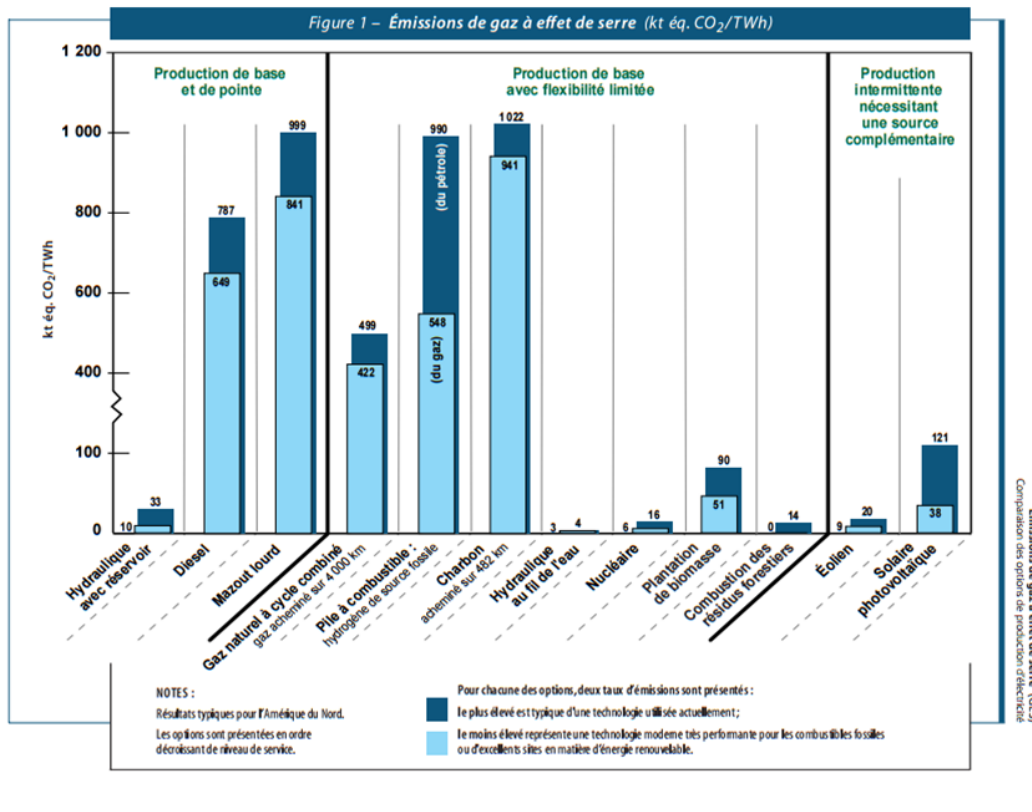
### 3. La production de gaz à effet de serre

#### 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 déclassé). 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. »*<sup>CIRAIG (2014) p.27</sup>

<sup>1</sup>[https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage\\_de\\_Grand%27Maison](https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_de_Grand%27Maison)





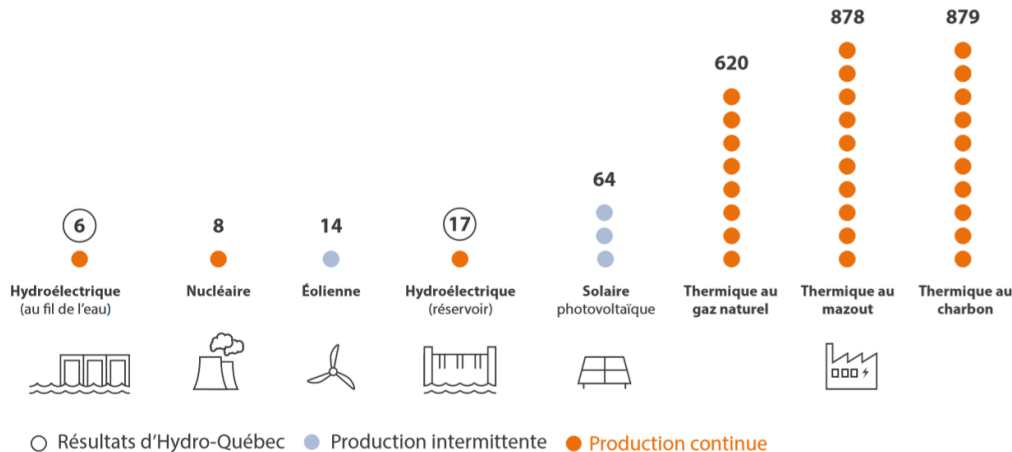
Comparaison en production de GES des options de production d'électricité suivant les scénarios minimum et maximum

La production des Gaz à Effet de Serre<sup>p.28</sup> 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 les contributions aux GES pour les centrales hydroélectriques 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.

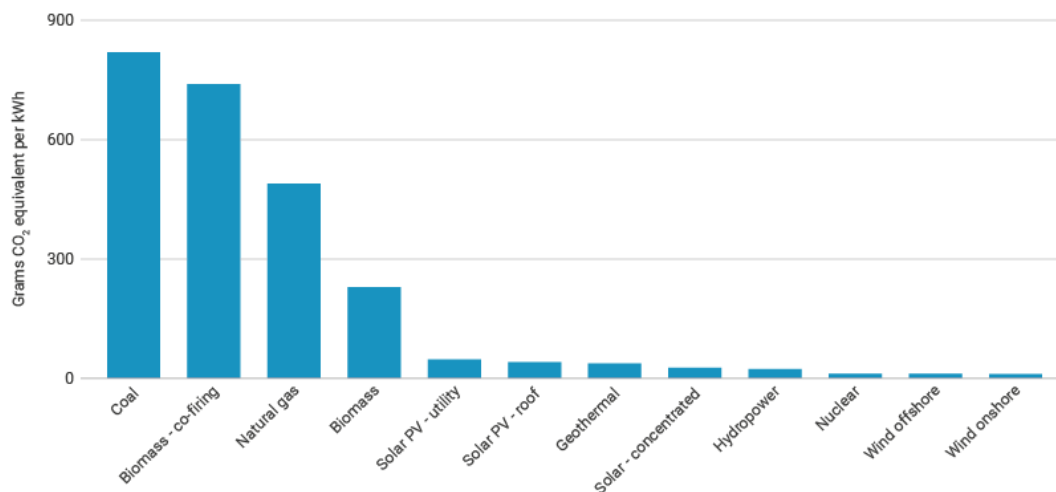
## ÉMISSIONS DE GES

### Émissions en g eq. CO<sub>2</sub>\*/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.

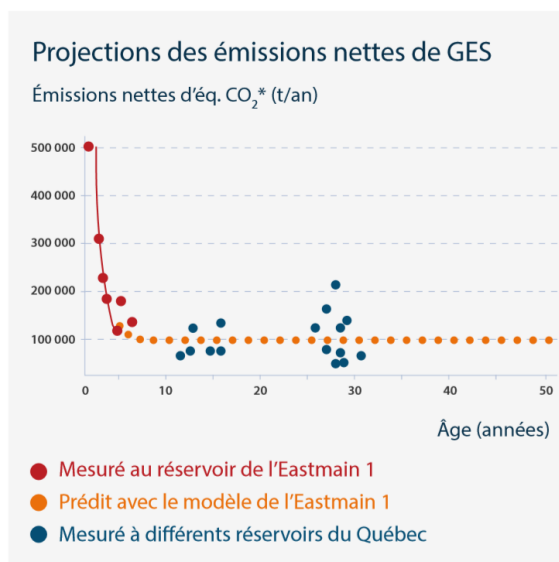


Équivalent en CO<sub>2</sub> pour un cycle de vie moyen

En terme de GES, la plus grande préoccupation reste les émissions dans les réservoirs. Il faut quand même noter que les quantités comparées 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**<sup>2</sup>.



Projection des émissions nettes de GES par Hydro-Québec



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.

Puisqu'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'énergie

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 :

$$Risque = Danger * Exposition$$

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*<sup>1</sup> les justifications pour exprimer le taux de mortalité en morts par TWh.

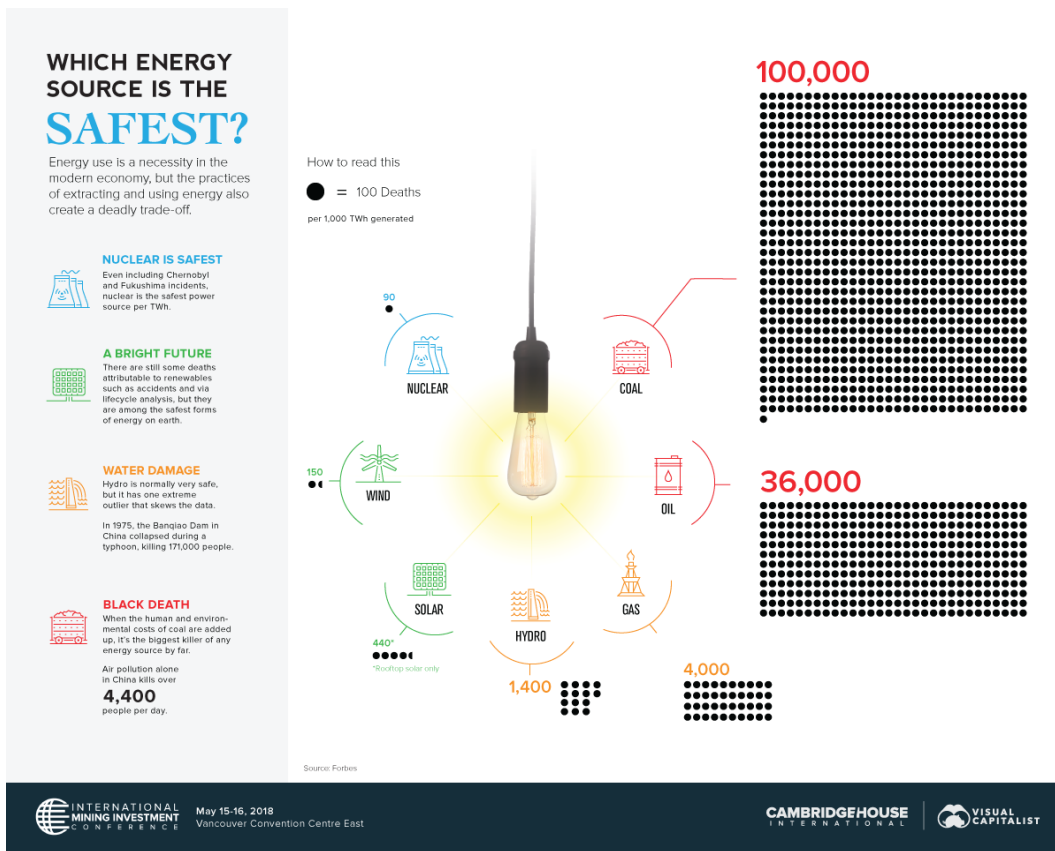
<sup>1</sup> <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.180.4490>

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 mille fois moins risquée que le charbon.

On trouve sur Wikipédia une liste exhaustive des ruptures de barrage<sup>1</sup>, qui constituent le type d'événement le plus dangereux en hydroélectricité. La rupture du barrage de Banqiao<sup>2</sup> 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'ajoutent pour les centrales à réservoir, des kilomètres carrés de terres inondées. En plus, une partie encore plus importante du territoire est asservie 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.

<sup>1</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Rupture\\_de\\_barrage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rupture_de_barrage)

<sup>2</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage\\_de\\_Banqiao](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 peuvent être :

- En complète exclusion
- En partage
- Sans aucune nuisance

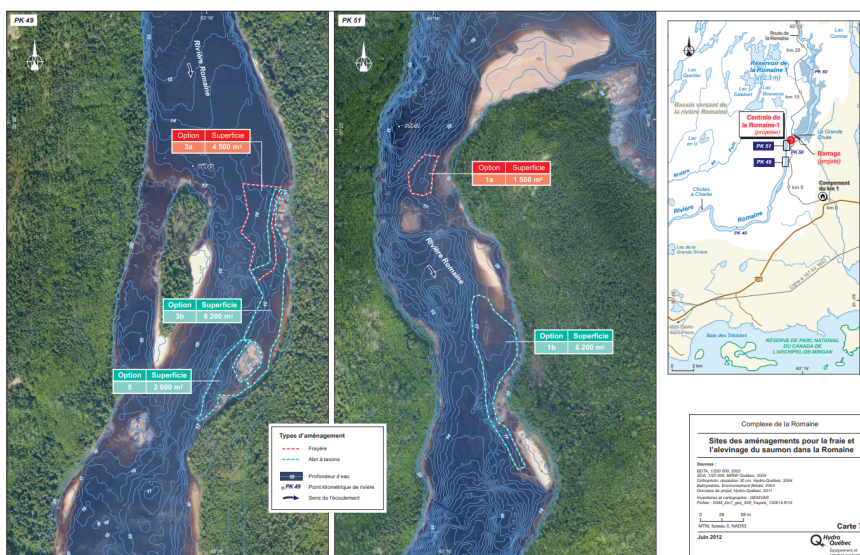
Il existe plusieurs solutions de mitigation qui sont mises en place.

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

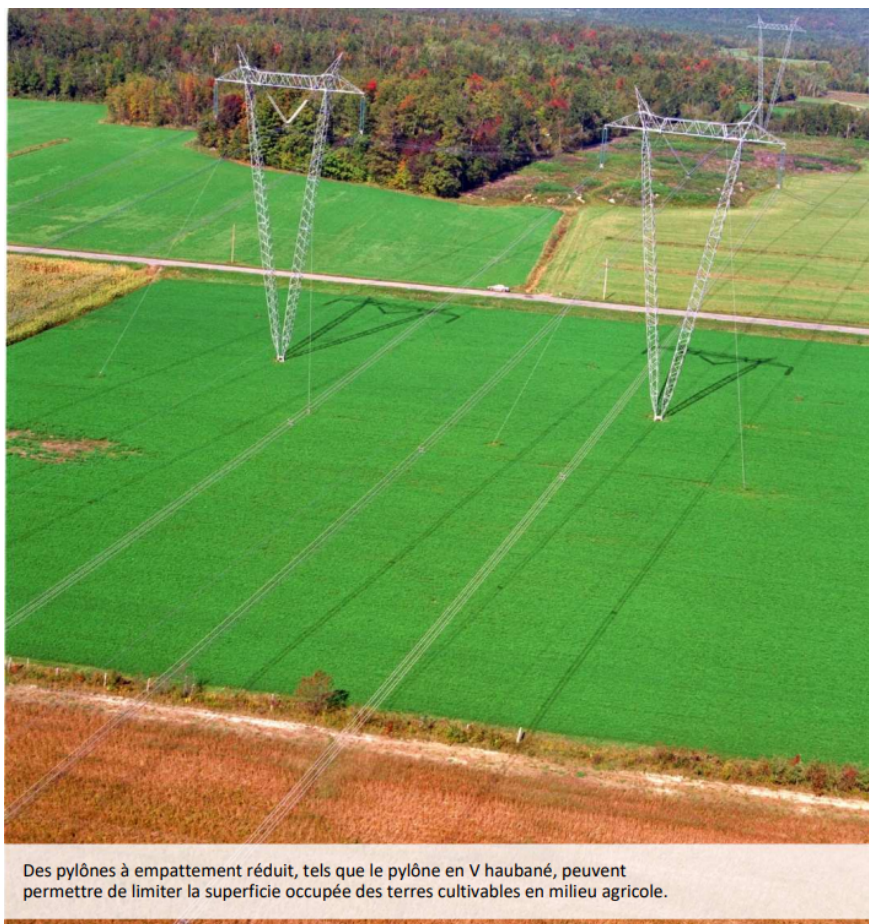
- plantations pour restaurer les surfaces mises à nu.
- aménagements de frayères pour faciliter la transition entre les milieux aquatiques passés et nouveaux.
- optimisations des espaces occupés



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<sup>p.26</sup>. 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.

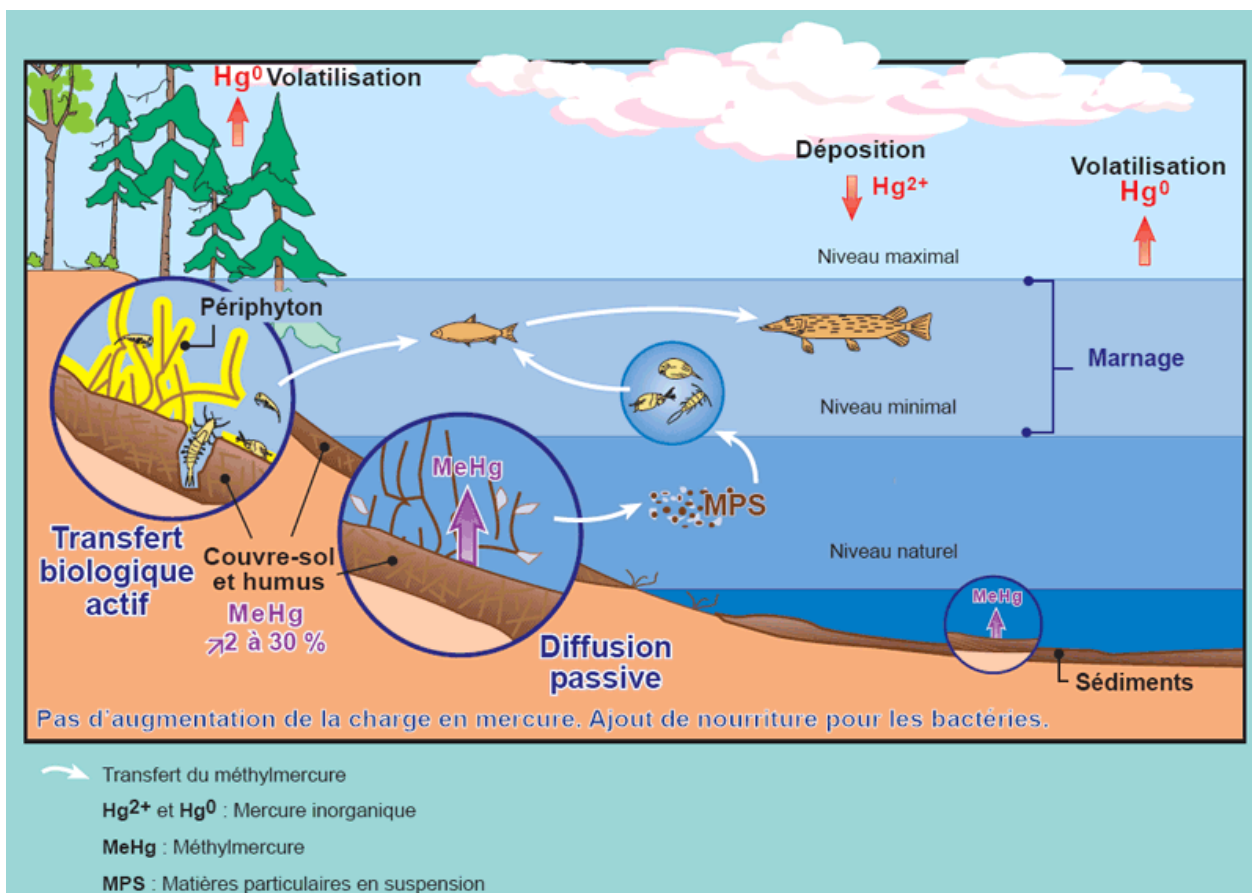
Cette eau est affectée de différentes façons :

- 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.

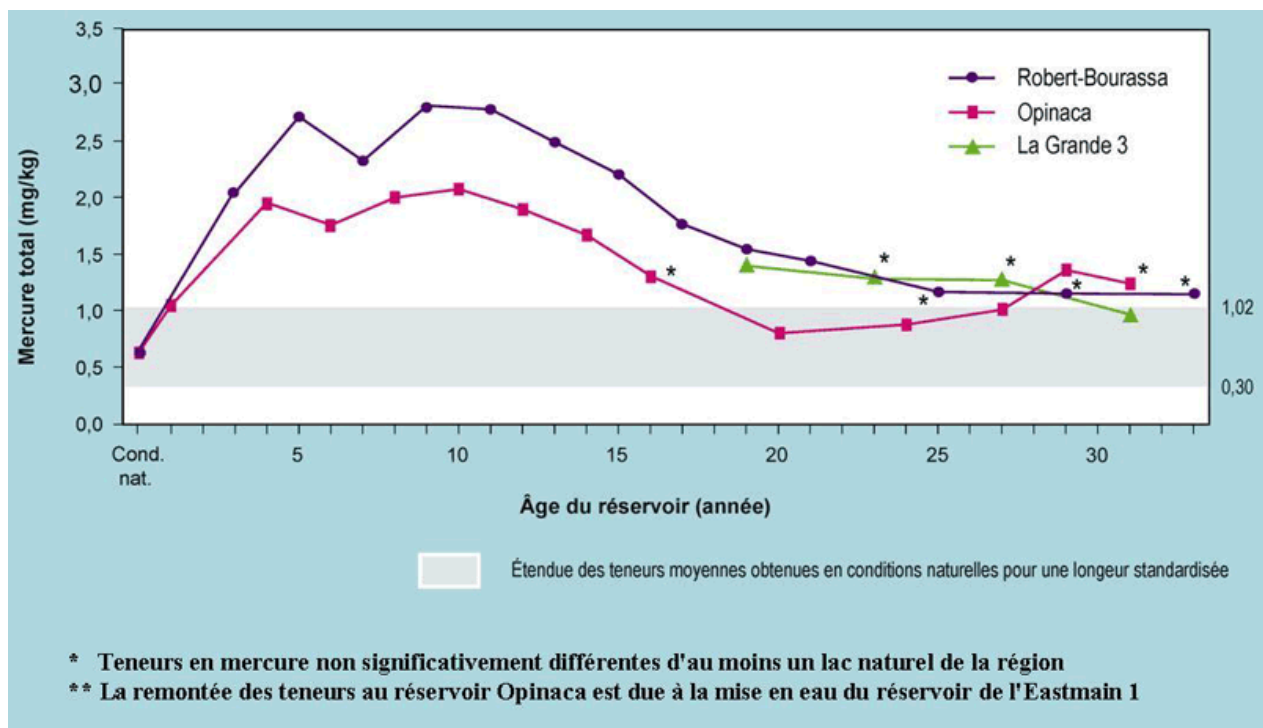
Lors de la mise en eau d'un nouveau réservoir, le mercure inorganique accumulé sur les terres est subitement transformé par les bactéries en une forme qui est facilement assimilée par les organismes vivants. Cette forme de mercure (le méthylmercure) peut devenir toxique à de fortes concentrations. Le 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 la réduction des lubrifiants minéraux<sup>1</sup> 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 cette 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<sup>2</sup>.

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 inondées. 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.

<sup>1</sup> [https://michelsabourin.scenari-community.org/SimTurbTech/co/1\\_2Reduction\\_des\\_lubrifiants\\_mineraux.html](https://michelsabourin.scenari-community.org/SimTurbTech/co/1_2Reduction_des_lubrifiants_mineraux.html)

<sup>2</sup> [https://michelsabourin.scenari-community.org/SimTurbTech/co/1\\_4Augmentation\\_de\\_loxygene\\_dissout.html](https://michelsabourin.scenari-community.org/SimTurbTech/co/1_4Augmentation_de_loxygene_dissout.html)



*Vanne de fond utilisée 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*

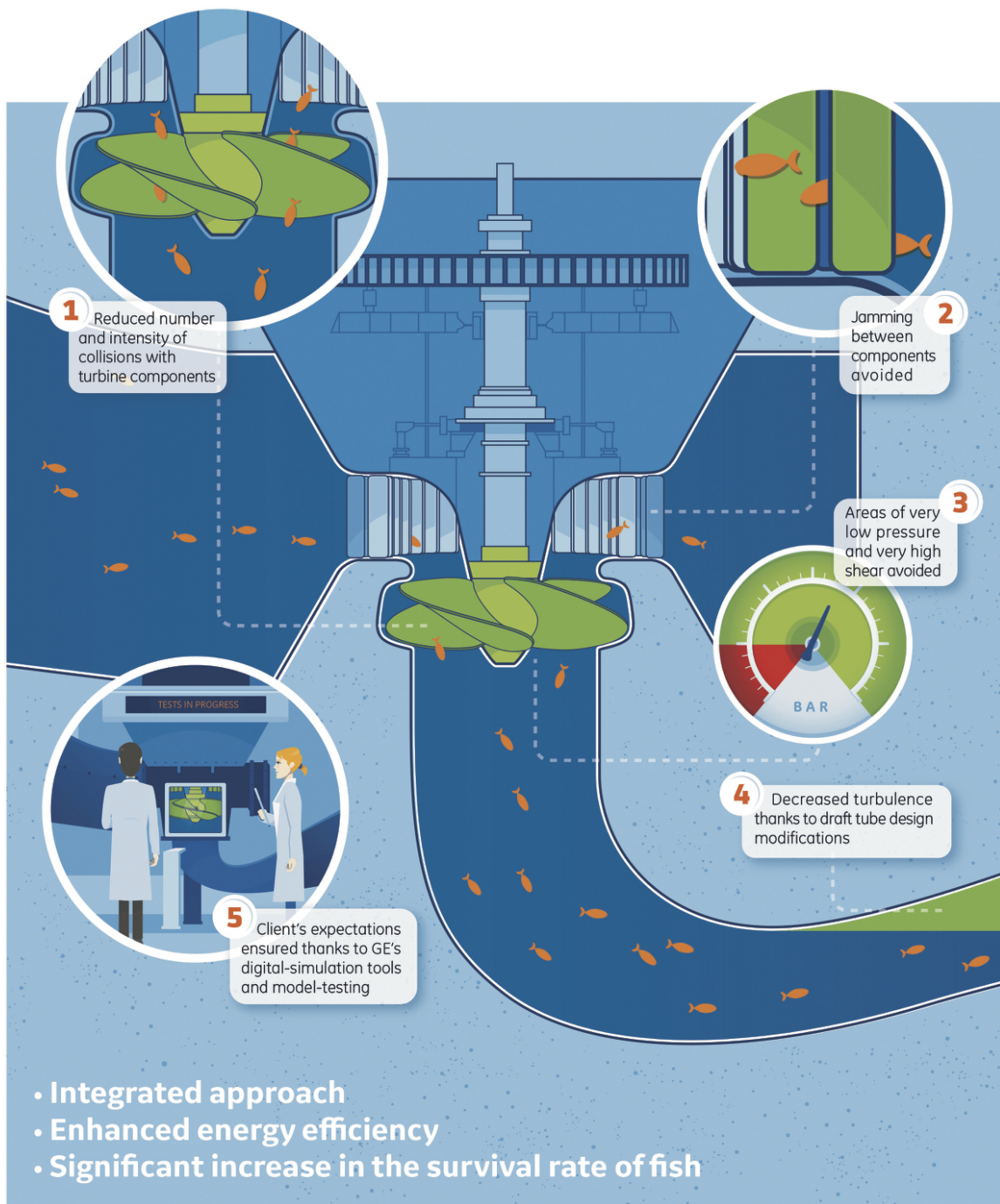
Là où les turbines peuvent être mises à contribution c'est lors de la dévalaison. En effet, pour franchir le barrage, la turbine présente un choix parfois incontournable, ce qui, essentiellement, justifie un travail d'optimisation.

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<sup>1</sup>.



## 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](https://www.ge.com/renewableenergy)

*Étude des phénomènes nuisibles aux poissons dans les turbines*

<sup>1</sup> [https://michelsabourin.scenari-community.org/SimTurbTech/co/1\\_3Les\\_turbines\\_ichtyophiles.html](https://michelsabourin.scenari-community.org/SimTurbTech/co/1_3Les_turbines_ichtyophiles.html)



Remarque

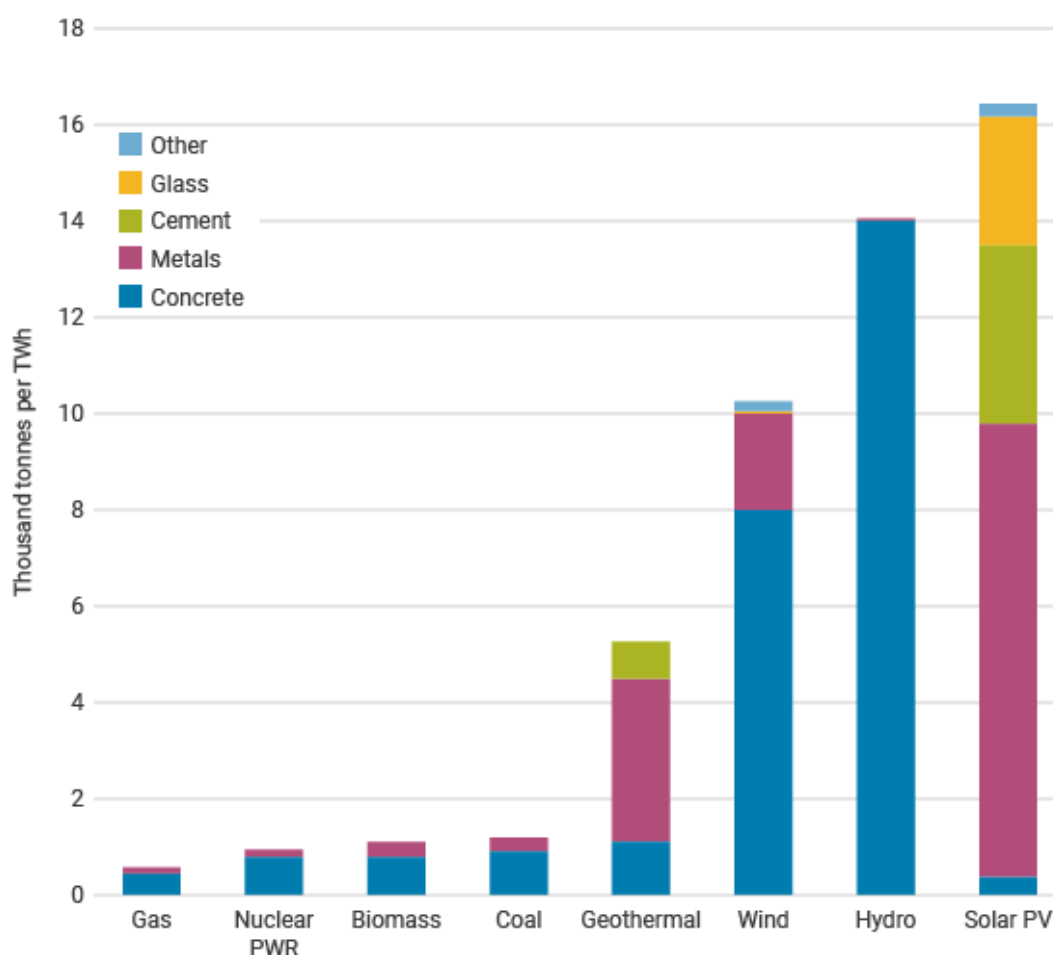
L'hydroélectricité est certainement la source d'énergie qui affecte les plus grandes surfaces de territoire. Toutefois, les impacts les plus importants font l'objet de solutions d'atténuation et globalement s'estompent dans le temps.

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<sup>p.26</sup> et avec le TRE<sup>p.26</sup>. En effet, les travaux nécessitant l'extraction et le raffinage 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 installations 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 de nos jours 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 implique 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 de nos jours 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 CO<sub>2</sub> sont émis par kWh produit par une centrale hydroélectrique réservoir?

- Moins de 9 g éq CO<sub>2</sub>/kWh
- 10 à 35 g éq CO<sub>2</sub>/kWh
- 36 à 50 g éq CO<sub>2</sub>/kWh
- 51 à 70 g éq CO<sub>2</sub>/kWh
- Plus de 71 g éq CO<sub>2</sub>/kWh

**4**

---

Parmi les sources d'énergie suivantes, laquelle implique 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**

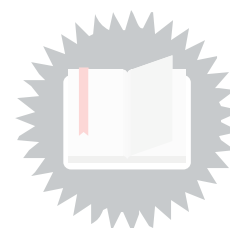
Gaz à effet de serre

## **TRE**

Taux de rendement énergétique

# Bibliographie

---



[CIRAIG (2014)] CIRAIG (2014). Résultats semblables à ceux du GIEC (2011); 2 Tremblay et coll. (2005)

# Webographie

---



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

[http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/pdf/pop\\_01\\_06.pdf](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](https://fr.wikipedia.org/wiki/Taux_de_retour_%C3%A9nerg%C3%A9tique)

# Index

---



Développement durable.....	4, 4
Efficacité énergétique .....	4
Energy Return on Energy Invested.....	6
Environnement .....	4
EROEI .....	4, 6
Gaz à effet de serre.....	4, 8
GES.....	4, 8
Performance environnementale	4
Taux de retour énergétique.....	4, 6
TRE.....	6

# Crédits des ressources

---



## **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](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](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](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](https://www.vgb.org/hydropower_fact_sheets_2018.html?dfid=91646), page 13, figure 1. 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)  
[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-Bourrassa 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/robertbourrassa-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

**Vanne de fond utilisée 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](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/Vanne_de_fond_du_barrage_de_l%27Hongrin_dans)

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

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>,  
<https://www.salmonrecovery.gov/Hydro/Structuralimprovements/AdultFishLadders.aspx>

**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>