

Hydroélectricité et développement durable

© Michel Sabourin 2020

Hiver 2020 28 février 2020



Hydroélectricité et développement durable

Table des matières

Objectifs	3
Introduction	4
I - Aménagement typique d'une centrale hydroélectrique	6
II - Hydraulique et hydroélectricité	7
1. Les caractéristiques de l'hydroélectricité	7
2. L'hydroélectricité dans le portefeuille énergétique mondial	11
3. Efficacité énergétique et environnementale	14
4. Le contexte d'affaire en hydroélectricité	17
III - Le système hydroélectrique	23
1. Les types d'installation	23
2. Les types de turbine hydraulique.....	29
3. Comparaisons entre les types de turbine.....	34
IV - Exercice : 6	35
V - Exercice : 7	36
Conclusion	37
Références	38
Webographie	39
Index	40
Crédits des ressources	41
Contenus annexes	46

Objectifs



Cette présentation a pour but de :

- Faire connaître la ressource hydraulique, son potentiel et sa place dans le bilan énergétique mondial.
- Évaluer et comparer dans une perspective de développement durable cette source d'énergie avec les autres disponibles.
- Décrire les caractéristiques du développement d'un projet hydroélectrique.

Introduction



Centrale Brilliant, BC, Canada

Faisant partie du portefeuille des énergies renouvelables, l'énergie hydraulique, comparée à toute autre source, constitue celle qui est la plus fiable et la plus économique tout en présentant l'empreinte écologique la plus faible. Elle produit au delà de 95% de l'énergie électrique consommée au Québec. Elle s'inscrit dans un système industriel mature comportant des expertises et fournissant du travail à des dizaines de milliers de personnes hautement qualifiées. Au Québec, en hydroélectricité, on retrouve des ingénieurs-conseils de toutes spécialités, des donneurs d'ordre et assembleurs d'équipement hydroélectrique, des manufacturiers d'équipement, des laboratoires de recherche, des opérateurs et gestionnaires, bref, un écosystème industriel dynamique qui propulse le cœur économique du Québec et génère de la richesse.

Il ne faut pas oublier que l'origine de cette énergie repose sur une technologie qui doit être maîtrisée et c'est dans cette optique que le cours ENR855 a été bâti.

Ce cours en génie mécanique porte sur la conception des turbines hydrauliques. Il comporte un volet important sur la théorie de l'hydraulique appliquée aux turbines et un autre sur la réalisation des machines.

Dans le cadre académique, on se concentrera sur les types de turbines qui sont utilisés au Québec mais la théorie présentée est applicable à tous les types.

Chaque cours portera sur un sujet particulier. Globalement, il y aura 5 cours sur la théorie de l'hydraulique, les autres porteront sur les essais et mesures, les procédés de fabrication, la conception mécanique, la réhabilitation des turbines existantes et les solutions environnementales.

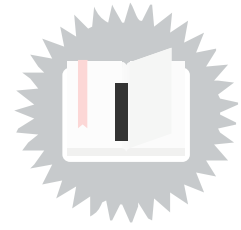
Il y aura un projet où les étudiants seront invités à remettre une soumission en réponse à un cahier des charges hydrauliques pour la fourniture d'une turbine.

L'évaluation portera à part égale sur le projet et un examen final à choix multiple.

Une visite de laboratoire est envisagée en dehors des heures de cours et sera discutée avec les étudiants.

Cette présentation est une introduction aux aspects sociaux économiques et de développement durable du développement des ressources hydrauliques.

Aménagement typique d'une centrale hydroélectrique



Aménagement typique d'une centrale hydroélectrique

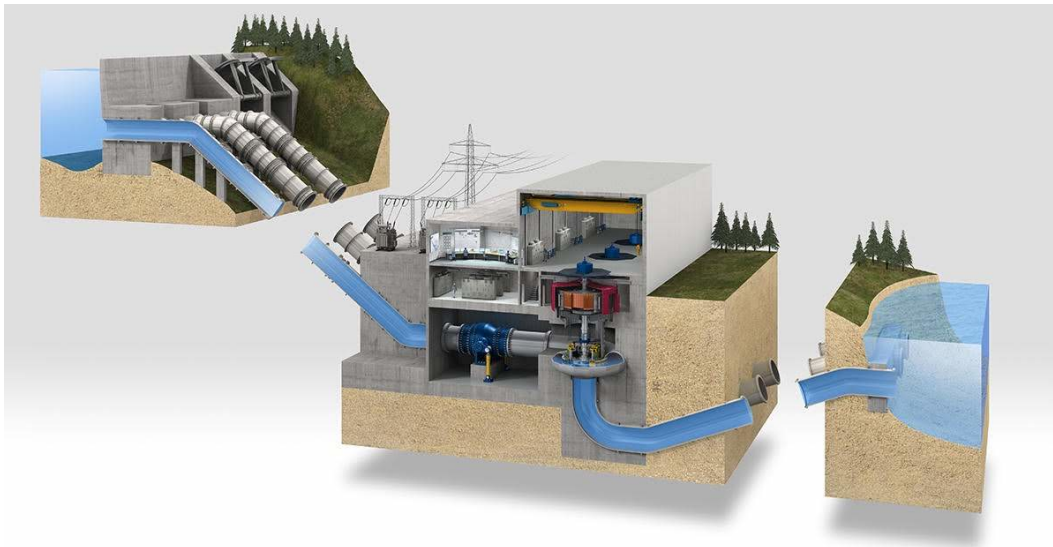
Voici une coupe d'un aménagement hydroélectrique typique.

Entre le niveau amont et aval, on y observe une prise d'eau normalement équipée d'une vanne activée par des treuils et précédée d'une grille à débris.

On a ensuite la conduite forcée qui amène l'eau à la centrale, suivie de la vanne de garde qui est un organe de sécurité.

Enfin, il y a la turbine surmontée de l'alternateur qui constitue le groupe de production électrique.

L'eau est ensuite évacuée par l'aspirateur qui peut joindre un canal de fuite pour le retour à la rivière.



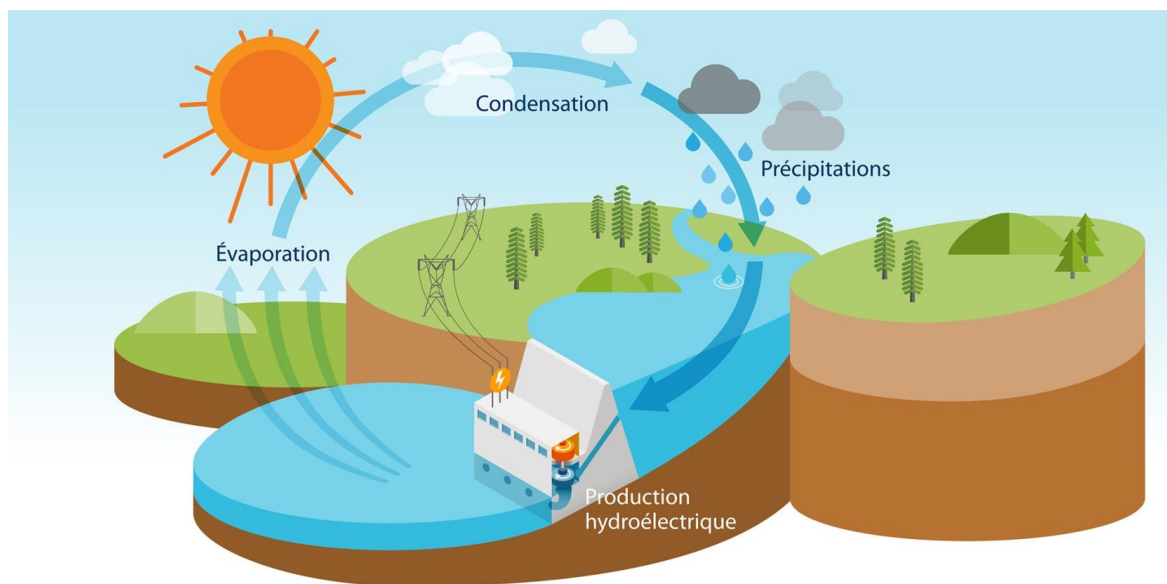
Vue en coupe d'une centrale hydroélectrique



1. Les caractéristiques de l'hydroélectricité

Une source d'énergie renouvelable

 Fondamental

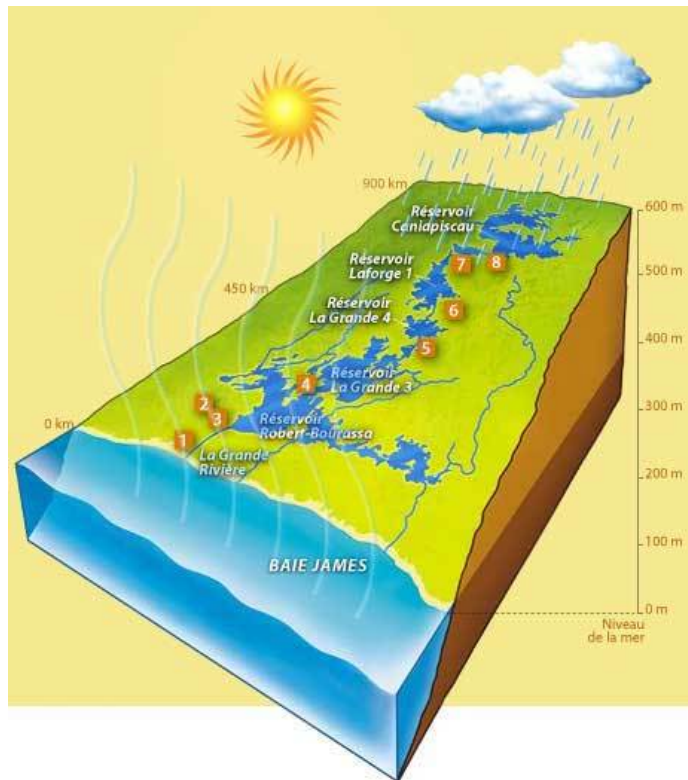


Le cycle de l'eau

L'énergie hydraulique est en fait une manifestation de l'énergie solaire. Dans le cycle de l'eau, le soleil évapore l'eau à la surface du globe. Les nuages sont constitués d'un équilibre entre la condensation et l'évaporation. Lorsque cet équilibre est rompu, la pluie dépose une partie de l'eau sur les plateaux terrestres qui sont en altitude par rapport au niveau de la mer. En altitude l'eau a une énergie potentielle qui se transforme en énergie cinétique lorsqu'elle est mise en mouvement. Si elle n'est pas captée par les turbines hydrauliques, cette énergie se transforme en chaleur dans la turbulence et se dissipe dans l'environnement. Pour fixer les idées, s'il n'y avait pas d'échange de chaleur avec l'environnement, l'énergie dissipée pour une chute de 100 m ferait monter la température de l'eau de 0,2 degré Celcius. C'est cette énergie qu'on souhaite transformer en électricité.*

Les avantages écologiques de l'hydroélectricité sont, entre autre :

- Être une source d'énergie renouvelable: pluie et neige.
- Ne libère aucun carbone fossile.



Réseau hydrologique de La Grande Rivière

L'aménagement de la Grande Rivière est un bel exemple d'une exploitation efficace de la ressource hydraulique.

Une capacité de production massive d'énergie



En plus d'être renouvelable, la production d'hydroélectricité peut être massive.

De fait, toute source d'énergie confondue, les plus puissantes centrales sont hydrauliques :















- 1267 GW de puissance installée en 2017 incluant 153GW en pompage-turbinage pour une production totale de 4 185 TWh.*
- Un potentiel de développement additionnel de près de 4000 GW.
- 16% de l'électricité mondiale.
- 60% de l'électricité au Canada.
- 95% de l'électricité au Québec.

Rang	Installation	Pays	Coordonnées géographiques	Puissance installée (MW)	Énergie produite annuellement (TWh)	Sources d'énergie
1	Barrage des Trois-Gorges	Chine	30° 49' 15" N, 111° 00' 08" E	22 500	98,8 (2014)	Hydroélectrique
2	Barrage d'Itaipu	Brésil / Paraguay	25° 24' 31" S, 54° 35' 21" O	14 000	98,63 (2013)	Hydroélectrique
3	Barrage de Xiluodu	Chine	28° 15' 52" N, 103° 38' 47" E	13 860	55,2 (2015)	Hydroélectrique
4	Barrage de Guri	Venezuela	7° 45' 59" N, 62° 59' 57" O	10 235	47 (en moyenne)	Hydroélectrique
5	Barrage de Tucuruí	Brésil	3° 49' 53" S, 49° 38' 36" O	8 370	21,4 (1999)	Hydroélectrique
6	Centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa	Japon	37° 25' 45" N, 138° 35' 43" E	7 965	33,3 (2011)	Nucléaire
7	Barrage de Grand Coulee	États-Unis	47° 57' 23" N, 118° 58' 56" O	6 809	21 (2008)	Hydroélectrique
8	Barrage de Xiangjiaba	Chine	28° 38' 57" N, 104° 22' 14" E	6 448	30,7 (2015)	Hydroélectrique
9	Barrage de Longtan	Chine	25° 01' 38" N, 107° 02' 51" E	6 426	18,7	Hydroélectrique
10	Barrage de Saïano-Chouchensk	Russie	54° 49' 33" N, 91° 22' 13" E	6 400	24,9 (2013)	Hydroélectrique
11	Centrale nucléaire de Bruce	Canada	44° 19' 31" N, 81° 35' 58" O	6 300	45 (2013)	Nucléaire
12	Barrage de Krasnoïarsk	Russie	55° 56' 05" N, 92° 17' 40" E	6 000	23,0 (2014)	Hydroélectrique
13	Centrale nucléaire de Yangjiang	Chine		6000		Nucléaire
14	Centrale nucléaire d'Ulchin	Corée du Sud	37° 05' 34" N, 129° 23' 01" E	5 881	48,16	Nucléaire
15	Centrale nucléaire de Yonggwang	Corée du Sud	35° 24' 54" N, 126° 25' 26" E	5 875	47,62	Nucléaire
16	Barrage de Nuozhadu	Chine	22° 33' 51" N, 100° 30' 46" E	5 850	23,9 (estimation)	Hydroélectrique
17	Centrale nucléaire de Zaporijia	Ukraine	47° 30' 44" N, 34° 35' 09" E	5 700	48,16 (en moyenne)	Nucléaire
18	Centrale Robert-Bourassa	Canada	53° 47' 43" N, 77° 26' 26" O	5 616	26,5	Hydroélectrique
19	Centrale thermique de Shoaiba	Arabie saoudite	20° 40' 48" N, 39° 31' 24" E	5 600	42 (estimation)	Fioul
20	Centrale thermique de Sourgout 2	Russie	61° 16' 46" N, 73° 30' 45" E	5 597	39,85 (2013)	Gaz naturel

Liste des importantes centrales de production d'énergie toute source confondue

Il est remarquable de constater que parmi les dix plus puissantes centrales électriques dans le monde neuf sont hydroélectriques. Toutefois, il faut observer qu'une tendance tend à s'imposer du point de vue du développement durable, c'est la décentralisation des moyens de production et les réseaux intelligents. L'hydroélectricité est tributaire de la localisation des gisements.

Puissance installée et production d'hydroélectricité en 2018

Région	Puissance totale fin 2018 (GW)	dont pompage-turbinage GW	Ajouts 2018 ⁱ² GW	Production 2018 (TWh)	Part 2018
Afrique	36,3	3,4	1,01	138	3,3 %
Asie méridionale et centrale	148,5	7,5	4	439	10,5 %
Asie orientale et Pacifique	480,4	68,0	9,2	1 534	36,5 %
Europe	251,7	57,5	2,2	643	15,3 %
Amérique du Nord et centrale	204,1	23,0	0,65	720	17,1 %
Amérique du Sud	170,8	1,0	4,85	726	17,3 %
Monde	1 291,8	160,3	21,8	4 200	100 %
Principaux pays producteurs					
 Chine	352,3	30,0	8,54	1 232,9	29,4 %
 Brésil	104,1	0,03	3,87	417,9	9,95 %
 Canada	81,4	0,2	0,40	381,2	9,1 %
 États-Unis	102,7	22,9	0,14	291,7	6,95 %
 Russie	48,5	1,4	0,06	183,8	4,4 %
 Norvège	32,3	1,4	0,42	139,5	3,3 %
 Inde	49,9	4,8	0,53	130,0	3,1 %
 Japon	49,9	27,6	-	88,5	2,1 %
 Venezuela	15,4	-	-	72,1	1,7 %
 France	25,5	7,0	0,002	63,1	1,5 %
 Suède	16,5	0,1	-	60,9	1,45 %
 Turquie	28,4	-	1,08	59,7	1,4 %
 Paraguay	8,8	-	-	59,1	1,4 %
 Colombie	11,8	-	0,11	56,6	1,3 %
 Viêt Nam	16,7	-	-	52,6	1,25 %
Source des données : International Hydropower Association ⁱ³ .					

Lorsqu'on compare la production d'énergie effective avec la capacité installée, on peut percevoir le niveau d'efficacité qui dépend du type de site et d'opération. Ainsi le Canada avec une puissance installée de 21% inférieure aux États-Unis obtient une production d'énergie de 31% supérieure. Le facteur d'utilisation ou facteur de charge peut être calculé ainsi :

$$\text{Facteur d'utilisation} = \frac{\text{Énergie produite annuellement}}{\text{Capacité installée} * 8760 \text{ heures par année}}$$

À l'échelle des pays, les États-Unis ont un facteur d'utilisation de 32% alors que le Canada est à 53%. Ce facteur d'utilisation est un chiffre important qui entre dans les calculs de rentabilité lors des études de faisabilité d'un projet. À titre indicatif au Québec en 2018, les chiffres du rapport d'*Hydro-Québec sur le développement durable** permettent de calculer un facteur d'utilisation de 54% pour le Québec.

Si on exploite une centrale pour faire de l'énergie de base, le facteur d'utilisation sera très élevé. Si par contre, on fait de la crête pour satisfaire la demande instantanée, pour faire de la puissance ou pour compenser les aléas d'une production intermittente (solaire, éolien), on aura un facteur d'utilisation plus faible.

Une production flexible

La réactivité des machines hydrauliques est très élevée. Elle permet de fournir à la demande instantanément. On pense en particulier ici, à la comparaison avec les turbines à vapeur qui elles, à cause de l'inertie thermique, ne peuvent répondre aussi rapidement à la demande.

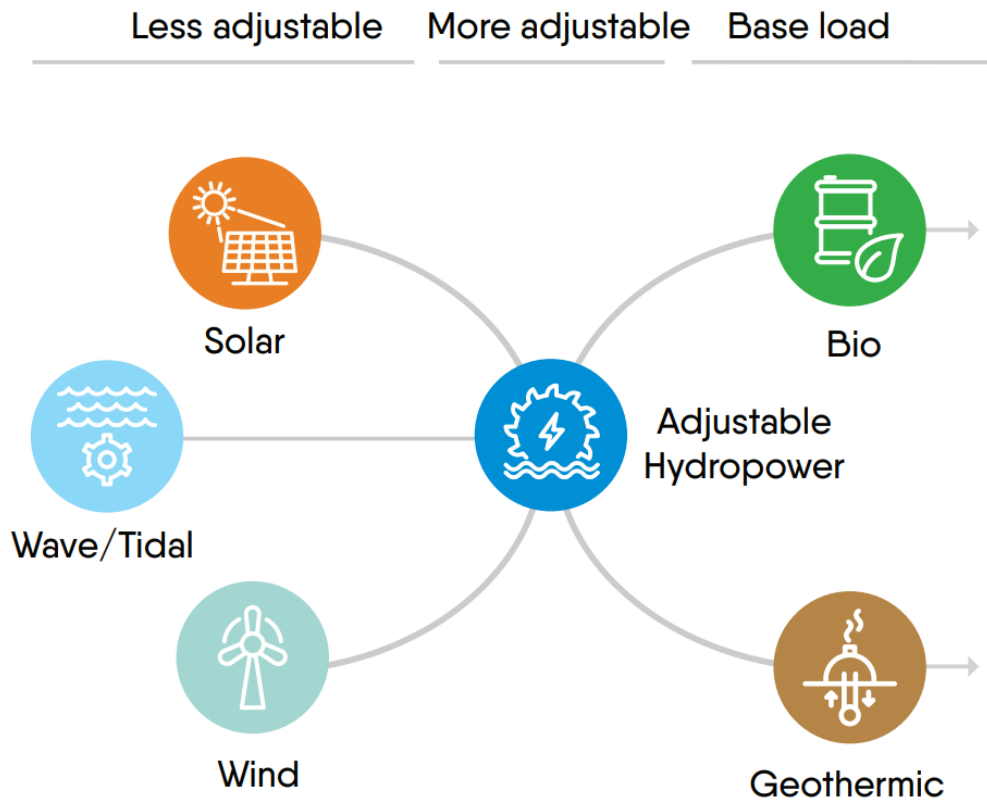
On dégage donc les avantages suivants :

- Une production sur demande avec une adaptation rapide à la demande grâce à une très grande plage de capacité de production.
- Une capacité de démarrage isolé sans aide du réseau.
- L'hydroélectricité compense sur le réseau les autres sources intermittentes et non prévisibles comme le solaire et l'éolien en :
 - fournissant l'énergie électrique demandée en excédent de leur capacité instantanée de production.
 - absorbant les surplus d'énergie lorsque la demande est plus faible.

« Le stockage en barrages hydroélectriques est une approche économiquement viable pour atténuer l'intermittence des sources d'énergie renouvelables. Cette approche (le pompage-turbinage) est exploitée actuellement en Europe du Nord, où le Danemark utilise les barrages scandinaves afin de gérer la variabilité de ses ressources éoliennes. * »

Il faut noter que les grands réservoirs d'Hydro-Québec permettent d'éviter le pompage-turbinage.

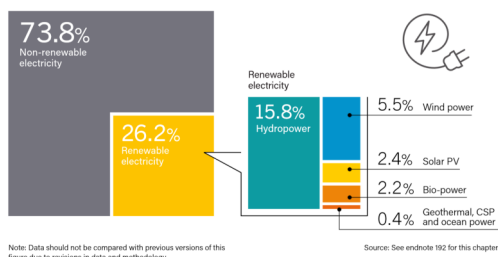
La consommation domestique absorbe l'énergie qui ne peut être stockée, comme celle des centrales au fil de l'eau ou celle provenant de l'extérieur du Québec alors que les réservoirs, avec leur capacité de stockage d'énergie énorme, peuvent avec les équipements moduler la production très facilement et à la demande. Par exemple, lorsqu'on accepte de l'énergie provenant de l'extérieur du Québec, les centrales avec réservoir diminuent leur production et gardent ainsi l'énergie en réserve.



Au cœur et en synergie avec le réseau, l'hydroélectricité permet de maximiser la capacité de production d'énergie renouvelable

2. L'hydroélectricité dans le portefeuille énergétique mondial

Portefeuille mondial fin 2018



Positionnement de l'hydroélectricité

Selon REN21*, les énergies renouvelables et l'hydroélectricité représentent respectivement 26.2% et 15.8% de l'énergie électrique mondiale produite en 2018. C'est une situation en croissance mais qui souffre de la persistance des investissements et des subventions accordés aux énergies non-renouvelables.

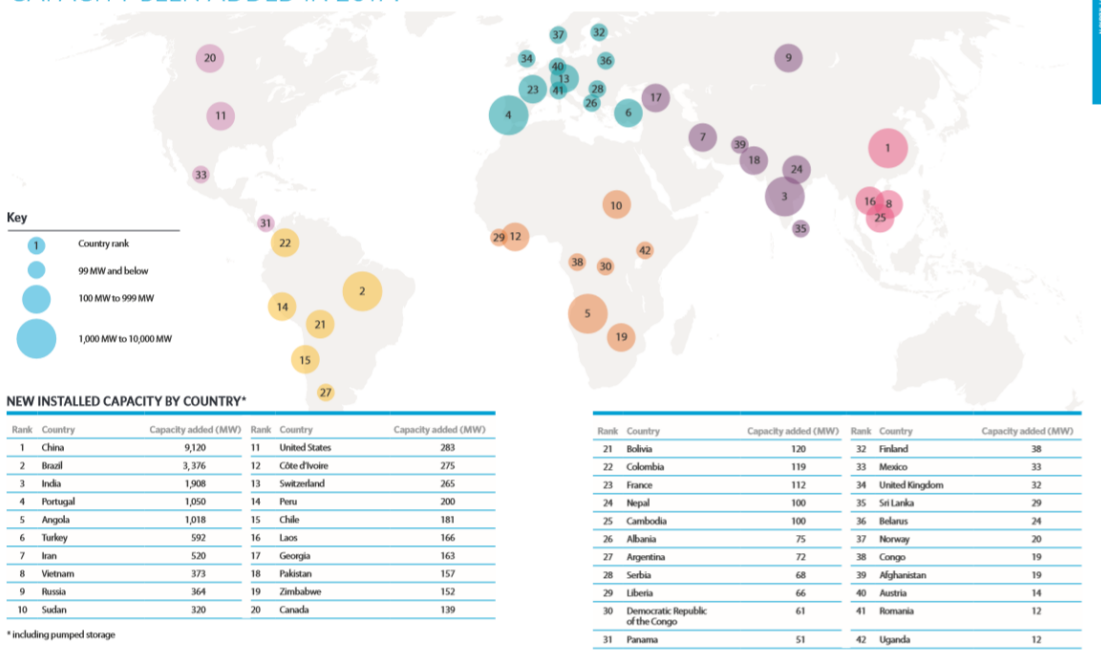
Position des énergies renouvelables dans le portefeuille mondial en 2018 selon REN21

Hydroélectricité - Une capacité en croissance

Dans le monde.

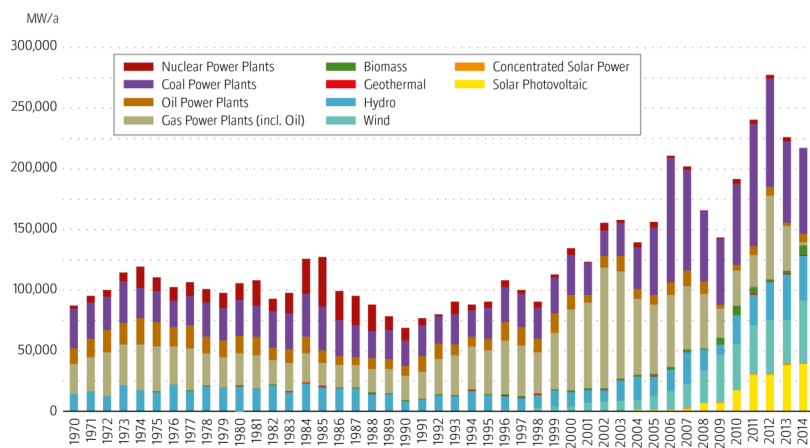
La construction de nouvelles centrales hydroélectriques montre une tendance ferme grâce principalement au développement économique en Asie.

WHERE HAS HYDROPOWER CAPACITY BEEN ADDED IN 2017?



Nouvelles installations hydroélectriques dans le monde pour l'année 2017

Global power plant market, 1970 – 2014

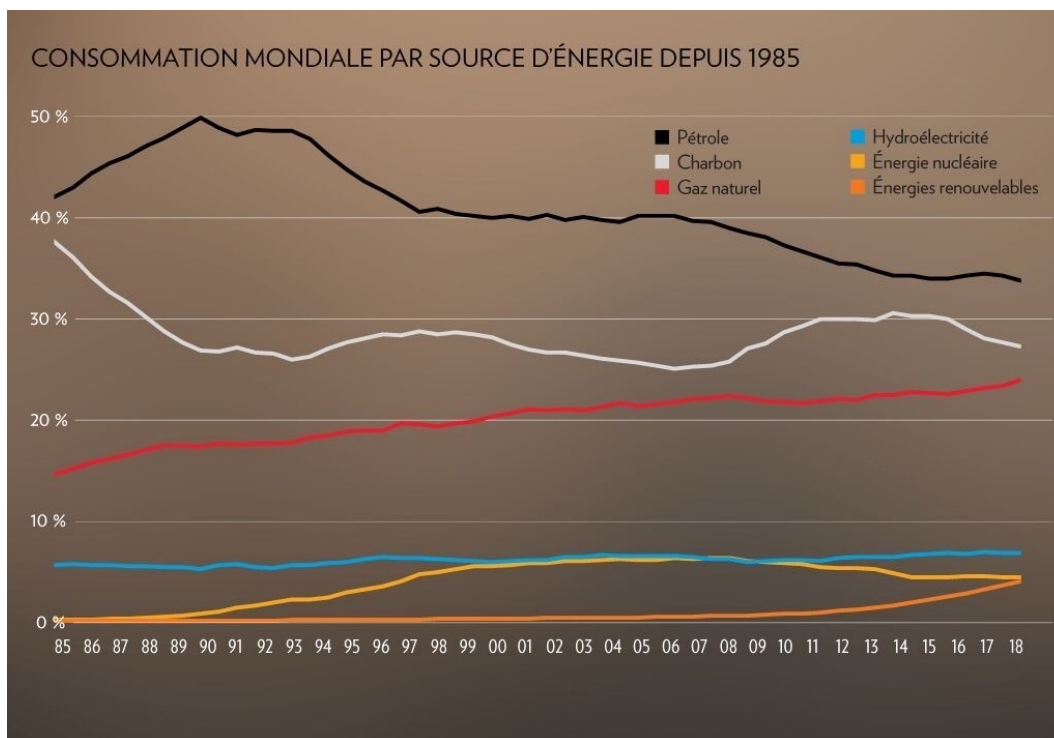


Renewables Global Futures Report Great debates towards 100% renewable energy



Source: Data: Platts, GWEC, SolarPowerEurope, REN21, Greenpeace, Data compilation: Dr. Sven Teske, UTS/ISF

Taux de construction des centrales par an et par source d'énergie

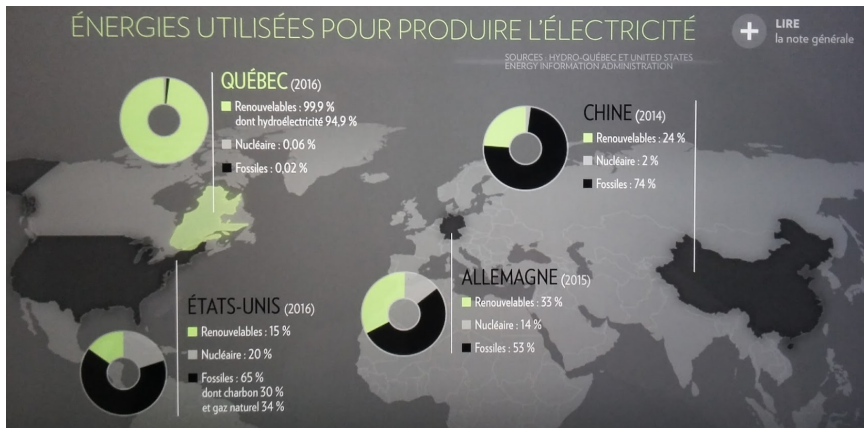


Consommation d'électricité mondiale par source d'énergie depuis 1985

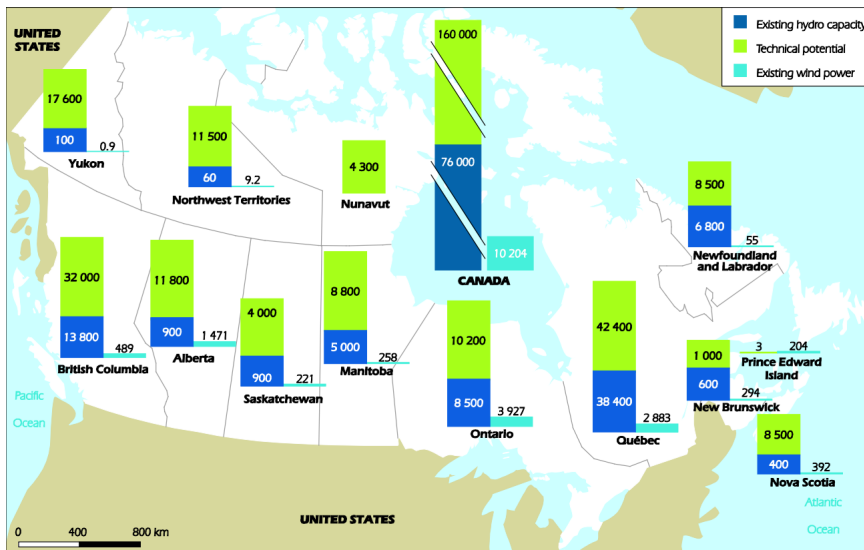
La croissance de la production hydroélectrique se maintient au fil des ans et est assez constante. Alliée aux autres sources d'énergie renouvelable, ces dernières semblent amorcer une croissance exponentielle qui se heurte à une forte résistance des énergies non-renouvelables qui dominent toujours la situation.

Au Québec et au Canada.

On observe qu'au Québec, la position des sources d'énergie renouvelable, grâce à l'hydroélectricité, est dominante.



Proportions des sources d'énergie

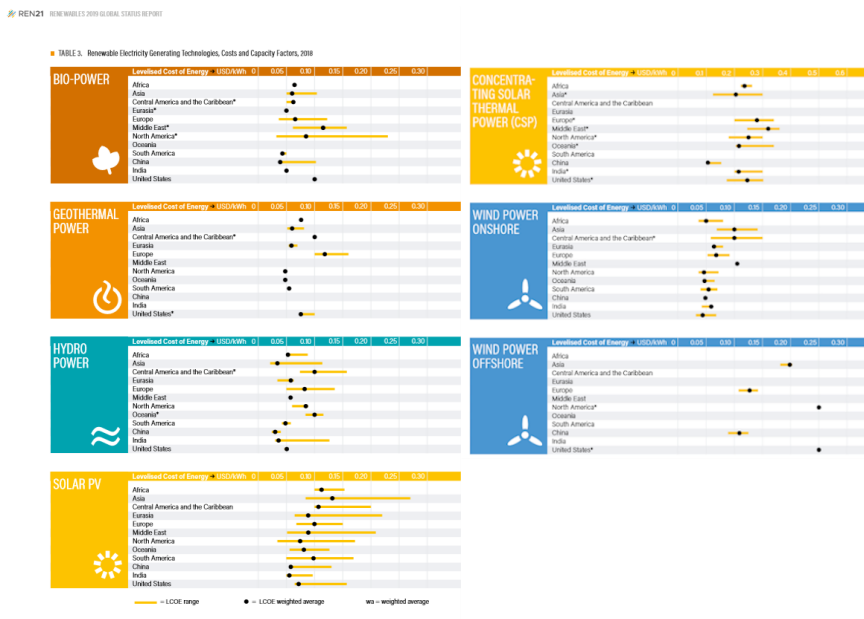


Capacité en hydroélectricité et éolienne en 2014 et potentiel hydroélectrique techniquement exploitable.

Le potentiel des gisements hydroélectriques au Canada reste important.

Coûts comparés des sources d'énergie renouvelable

On observe que l'hydroélectricité demeure compétitive par rapport aux autres sources d'énergie renouvelable. Toutefois, les meilleurs sites sont en grande partie déjà en exploitation et les coûts des autres technologies tendent à diminuer.



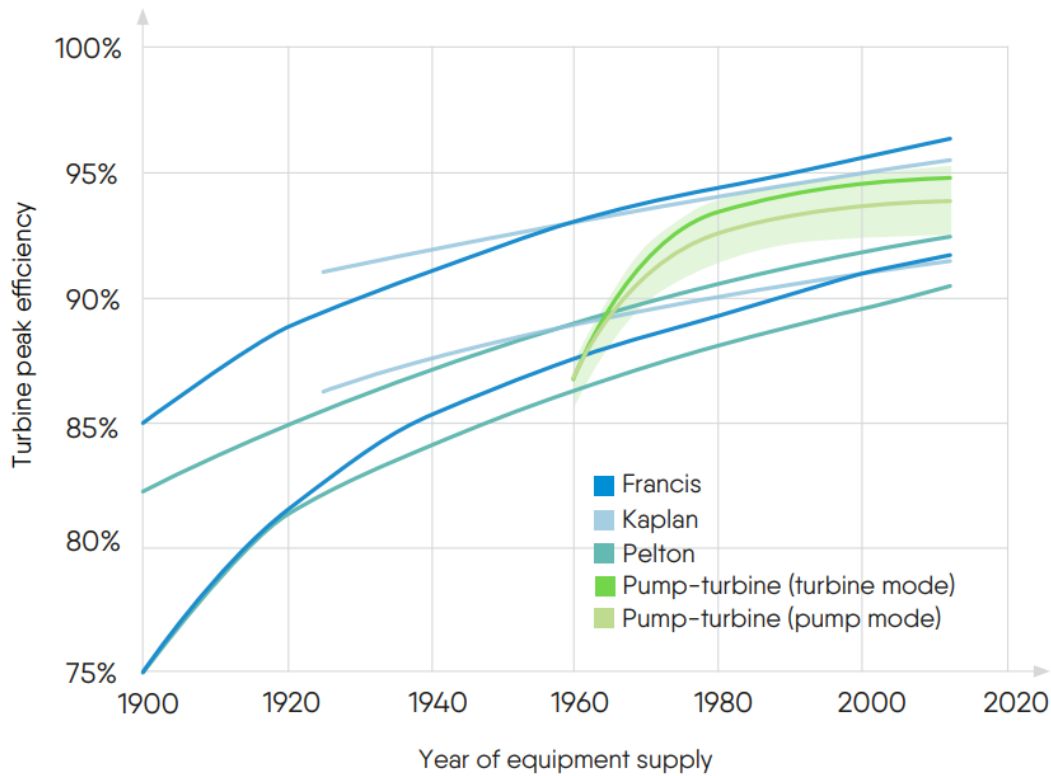
Coûts comparés des sources d'énergie renouvelable fin 2018.

3. Efficacité énergétique et environnementale

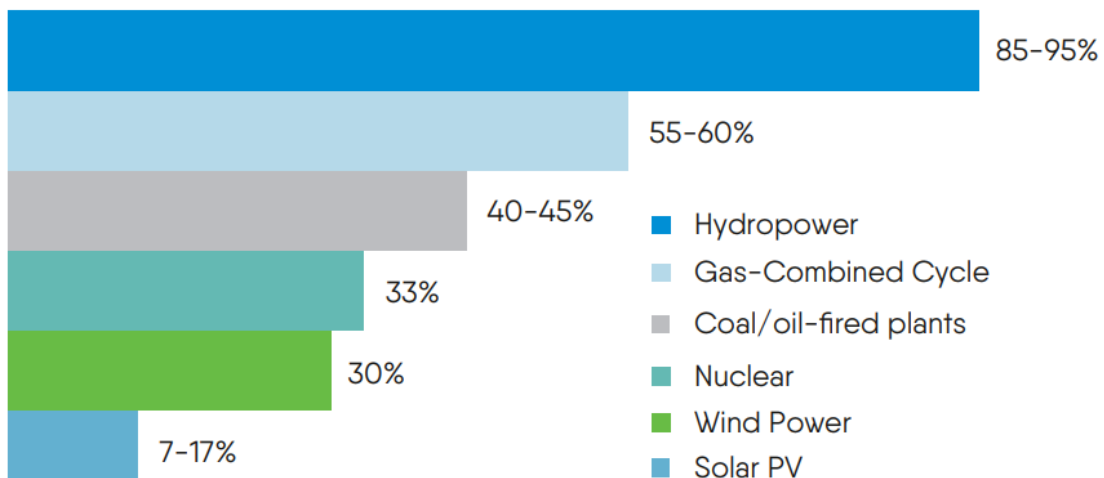
Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique exprime la proportion entre l'énergie transmise et l'énergie hydraulique brute.

- 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%*.



Évolution dans le temps des rendements des turbines hydrauliques



Efficacité des différentes sources d'énergie



Fondamental

En terme de transformation de l'énergie, le traitement de la ressource hydraulique par les centrales hydroélectriques est très efficace.

Taux de retour énergétique



Fondamental

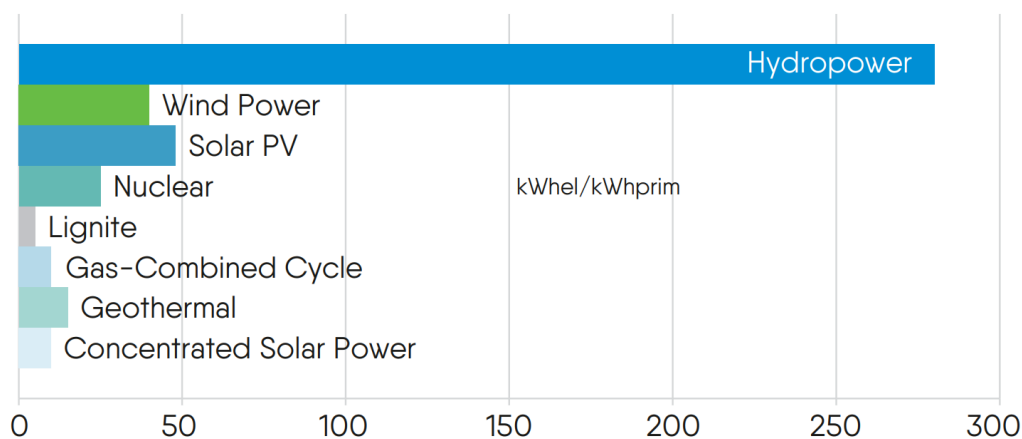
Le *taux de retour énergétique** exprime un autre aspect de l'efficacité d'une source d'énergie. Il s'agit de considérer l'énergie pour construire et maintenir un système de production par rapport à sa production prévue durant sa vie utile.

EROEI = Énergie livrée/ Énergie dépensée

Energy Return on Energy Invested = Taux de retour énergétique

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			
Méthanol (de bois)	2,6			

Le Taux de Retour Énergétique



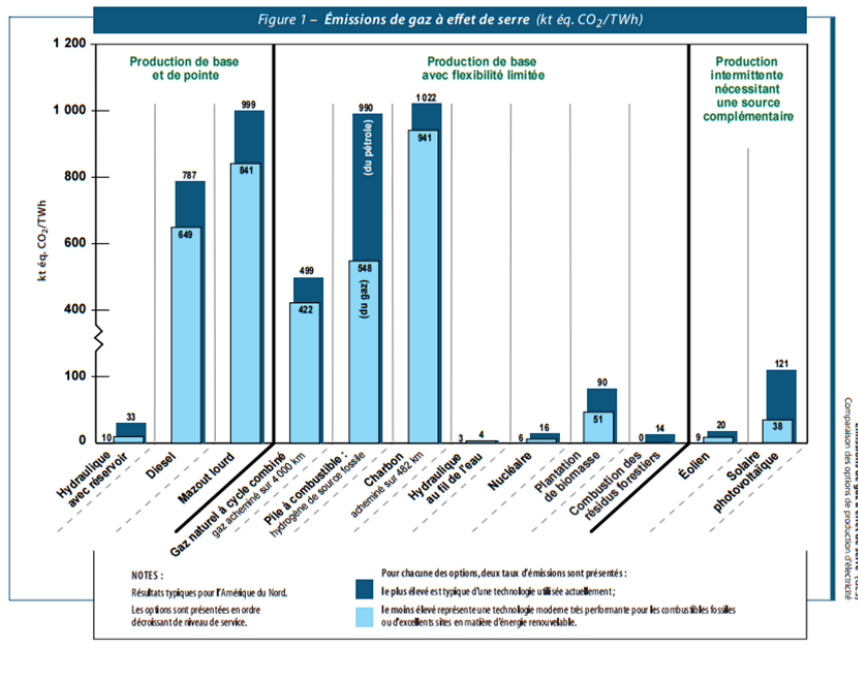
Taux de retour énergétique comparés



Remarque

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

Production de gaz à effet de serre

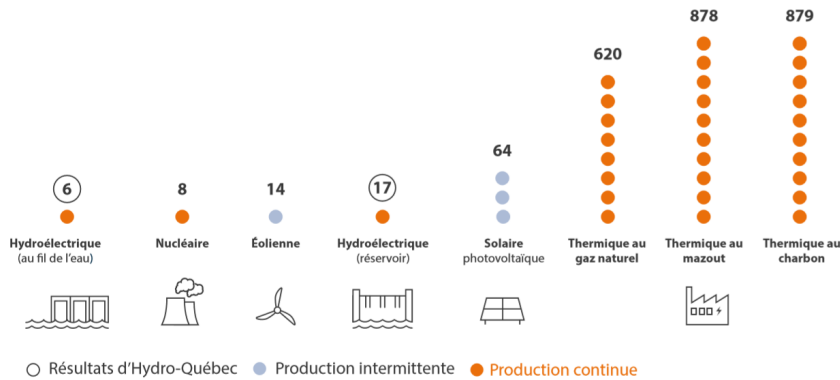


Comparaison en production de GES des options de production d'électricité suivant les scénarios minimum et maximum

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

ÉMISSIONS DE GES

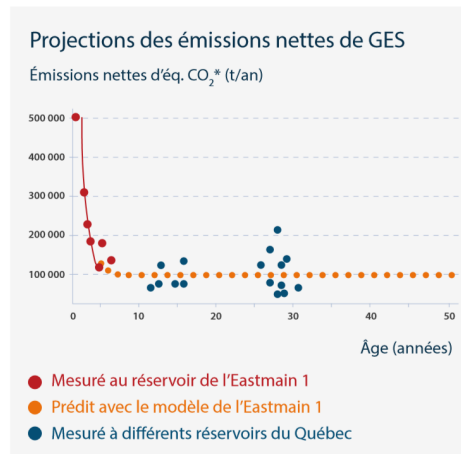
Émissions en g éq. CO₂*/kWh des différentes filières



Comparaison des émissions en GES de différentes filières énergétiques

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 naturels².



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 EROEI, 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 avantageuse.

4. Le contexte d'affaire en hydroélectricité

Caractéristiques du marché des machines hydrauliques

Le marché des machines hydrauliques est un domaine d'affaire qui échappe souvent à la compréhension des gestionnaires. Alors que la doctrine d'Adam Smith conduit à la standardisation et la spécialisation des tâches, certains poussent l'interprétation jusqu'à la standardisation des produits. La production en série de produits de consommation leur donne raison. Toutefois, dans le domaine de l'hydroélectricité et en particulier celui de la grande hydro, il n'est pas économiquement viable d'offrir un produit standard produit en série, une turbine hydraulique est toujours considérée comme unique et prototype. Cette caractéristique et bien d'autres aspects seront traités dans les prochaines lignes.

On observe des tendances propres au domaine hydroélectrique qui sont les mêmes partout **dans le monde** :

- Coûts de mise en œuvre élevés.
 - Un aménagement hydroélectrique nécessite des travaux civils de grande envergure pour tirer profit d'un site déjà avantageux qui est souvent éloigné des centres de consommation. On déplace des montagnes, creuse des tunnels, aménage des routes, construit des structures en béton, etc.
- Délais de mise en œuvre longs.
 - Ces travaux se calculent en années, pendant lesquelles il n'y a pas de production ni de retour sur l'investissement qui est colossal.
- Généralement propriété de l'État ou filiale.
 - La nature des entreprises privées est en général incompatible avec des retours sur investissements à très long terme. Le projet hydroélectrique est plus un projet de société ou national.
- Essais sur modèle réduit pour valider la conception hydraulique.
 - La physique des écoulements et la nature unique des conceptions font que pour valider la conception de la turbine et ainsi diminuer les risques financiers, on fabrique et teste un modèle à une échelle réduite de la turbine industrielle, pour en mesurer les performances. Cela entraîne des délais et des coûts non-négligeables.
- Coûts de production faibles.
 - Une fois la centrale mise en service, son exploitation ne nécessite aucun carburant à acheter. Son opération peut se faire à distance. Il faut très peu de personnel pour opérer une centrale de façon sécuritaire.
- Maintenance faible.

- Les turbines hydrauliques sont certainement les machines les plus fiables faites par l'homme. Certes, de façon préventive, des inspections périodiques sont préconisées. Généralement, les usures conduisent à une réhabilitation tous les 35 ans environ pour des machines qui ont été en opération à plein temps.

L'**Amérique du Nord** se distingue des autres marchés par les caractéristiques suivantes :

- Les opérateurs sont compétents et exigeants.
 - Ils ont dépassé le stade d'achat et de mise en service des équipements, ils cumulent une expérience d'exploitation qui se compte en plusieurs dizaines d'années et ils font face à de nouveaux requis environnementaux et sociaux qui orientent leurs critères et leurs spécifications techniques.
- Économie mature.
 - L'économie du pays est compétitive ce qui favorise les compétences du personnel et l'optimisation du produit. De plus, dans cette économie mature, le marché s'oriente vers la réhabilitation des installations existantes.
- Opérateurs innovateurs dans les requis.
 - Les nouveaux requis de performances et les nouveaux problèmes à résoudre poussent au développement et à la recherche de solutions innovantes. On veut des turbines : qui produiront plus d'énergie à partir de la même ressource, demandant encore moins de maintenance, sont compatible avec les nouveaux critères environnementaux : ichtyophile ("fish friendly"), qualité de l'eau (augmentation de l'oxygène dissout), etc.
- Performance et fiabilité.
 - Les coûts de main d'œuvre élevés font que l'on veule minimiser les interventions. Les temps d'arrêt prévus et encore plus ceux intempestifs, doivent être réduits. La valeur de l'énergie et de la puissance conduit à une course au rendement où chaque dixième de pourcent de rendement vaut une fortune.
- Requis environnementaux.
 - Sous les pressions sociales, on doit diminuer l'impact environnemental en favorisant la vie aquatique et en éliminant tout effet délétère dû au système hydro-électrique. Cela conduit, entre autre, à la conception de turbines ichtyophiles ("fish friendly") qui augmentent le taux de survie des poissons les traversant, ou aérantes qui elles, introduisent de l'oxygène dans l'eau de la rivière pour favoriser la vie aquatique.



La centrale Manic-5 et le barrage Daniel Johnson sont une icône du développement hydroélectrique

Chaque projet est unique



Plusieurs raisons motivent le fait-sur-mesure en hydroélectricité. Ce sont les conditions hydrauliques, les conditions d'exploitation et les aspects culturels.

D'abord, les aspects physiques et donc les **conditions hydrauliques** particulières du site. Par exemple :

- Le marnage (variation des niveaux d'eau dont dépend la chute),
 - est intimement lié à la géographie du site,
 - varie suivant les saisons,
 - le niveau aval et donc la chute varie avec le débit dans certaines conditions ce qui influence le comportement en cavitation.
- Le débit
 - est aussi très lié à la géographie du site, au réseau hydrographique, au climat, à la saison, etc.
 - Selon le type de centrale, au fil de l'eau ou réservoir, le débit peut être dicté par la rivière ou par le besoin en électricité.
 - Selon le nombre de machine en opération et leurs dimensions, le débit par machine variera.
- Le choix de l'enfoncement de la turbine par rapport au niveau aval dépend aussi des conditions du site et des coûts de constructions.
 - Pour une centrale souterraine, l'enfoncement a moins d'effet sur les coûts alors que Pour une centrale au fil de l'eau ou en surface, l'enfoncement augmentera les coûts du civil.
- La qualité de l'eau peut aussi influencer la conception de la turbine.
 - Une eau chargée en sable va nécessiter des attentions particulières. Par exemple, on cherchera à diminuer les vitesses d'écoulement et/ou on utilisera des matériaux ou des revêtements résistants à l'abrasion.
 - Une eau désoxygénée nécessitera une aération.

Les **conditions d'exploitation** influenceront aussi la conception de la machine.

- Une opération stable donnera la priorité à l'énergie et au niveau de rendement.
- Une opération pour fournir la pointe, imposera des chargements statiques et dynamiques importants causant de la fatigue à l'équipement.

La culture des intervenants sur le projet laisse aussi sa marque. Par exemple :

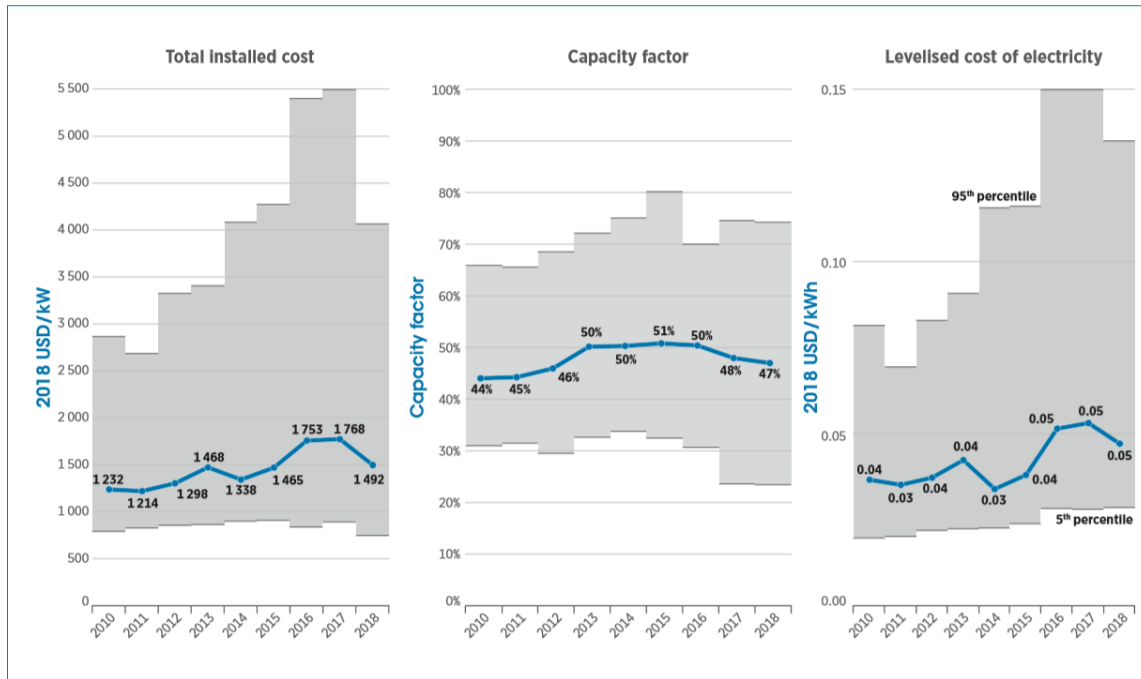
- Le choix du type de machine peut être fortement influencé par l'expérience des intervenants. Certains opérateurs vont préférer les turbines hélices aux Kaplan à cause de leur fiabilité et de leur très haut rendement. Alors, que d'autres préféreront les Kaplan qui donnent plus de souplesse dans leur exploitation.
- Les choix des matériaux de construction sont aussi souvent imposés. Certains voudront un blindage aspirateur sur de plus grandes surfaces. Certains préféreront un acier inoxydable martensitique pour la roue, alors que d'autres ne jurent que par l'acier inoxydable austénitique.
- Des choix sur la conception de la centrale, par exemple, le support de la butée axiale : cône de support pivot ou croisillon ; le démontage de la roue par en dessous pour faciliter l'entretien, etc.
- Sous les pressions sociales, des restrictions environnementales imposeront des mesures adaptées. On peut vouloir limiter l'utilisation de lubrifiant minéraux, améliorer la survie des poissons, etc.

Toutes ces raisons font que chaque aménagement est unique, que l'équipement est dimensionné et conçu sur mesure. De plus, le nombre de machines dans un aménagement est réduit. C'est pourquoi on appelle la machine industrielle le prototype par opposition au modèle réduit.

Évolution des tendances en hydroélectricité

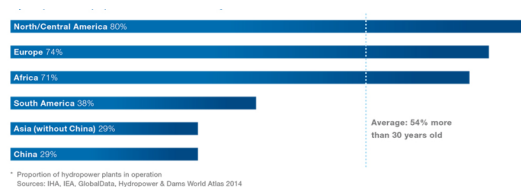


Lorsqu'on regarde les coûts des nouveaux projets, on observe une tendance à la hausse que ce soit au niveau des coûts d'installation ou des coûts de l'électricité produite. Le lien entre les deux est le facteur d'utilisation. Ceci évidemment concerne les nouvelles installations. Toutefois, pour les économies matures comme l'Amérique du Nord et l'Europe, la réflexion n'est plus à ce niveau. On s'intéresse plutôt à la réhabilitation des installations existantes.



Évolution des coûts d'installation, de production et du facteur d'utilisation en hydro

Les économies matures, Europe et Amérique du Nord, sont engagées depuis une vingtaine d'années dans un programme de réhabilitation des centrales hydroélectriques. On observe que les machines de plus de 30 ans d'âge représentent 54% des installations et qu'elle se concentrent principalement en Europe et en Amérique du Nord. Mais rapidement on perçoit un début d'activité de réhabilitation en Amérique du Sud. Il s'agit d'abord d'une opportunité d'affaire. Environ 80% du marché de l'équipement hydroélectrique en Amérique du Nord est constitué de réhabilitation.



Inventaire des équipements hydroélectriques vieux de plus de 30 ans dans le monde

Pourquoi poursuivre le développement technologique en hydroélectricité?

D'aucun pense que les centrales hydroélectriques sont une vieille technologie, elles ont été inventées il y a plus de cent ans et on n'en entend peu parler.

En fait, comme pour les avions qui existent depuis à peu près cent ans et dont la conception originale a été conservée, les avions ont toujours des ailes et un empennage, la technologie et la performance des avions comme des turbines hydrauliques ont grandement évolué.

Les équipements hydroélectriques utilisent des technologies de pointes pour obtenir des performances toujours améliorées. C'est le fruit d'une recherche et développement intense et continue qui est motivé par de nombreux avantages économiques, environnementaux et sociaux.



La centrale Les Cèdres en 1910 : classée monument historique en 1984.

Le développement et l'implantation de nouvelles technologies sont motivés par quelques incitatifs :

- La production électrique est une source de revenu très importante.
- Les temps d'arrêt ou les délais de mise en route sont très coûteux.
 - En cas de panne, l'énergie ou la puissance de remplacement doivent être prévues.
- Les arrêts intempestifs qui compromettent la fiabilité sont à éviter.
 - En urgence, l'énergie et la puissance de remplacement ne sont peut être pas disponibles localement, la panne peut entraîner une panne globale du réseau.
- Le respect de l'écologie est un permis pour exploiter.
 - Des solutions environnementales doivent être développées et mise en œuvre lors de la réhabilitation.



La centrale Les Cèdres en 2009.

Étude économique de la production d'une machine



Imaginons, un groupe turbine alternateur qui produit 100 MW à pleine puissance. Ce qui n'est pas exceptionnel.

Supposons un facteur d'utilisation de 80%, et un prix de vente de 0,05\$ du kilowatt-heure.

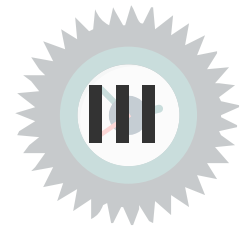
Une journée de production =

$$100 \text{ MW} * 1000 \text{ KW/MW} * 80\% * 24 \text{ heures/jour} * 0,05\$/\text{KW-hre} = \sim 100\,000 \text{ \$/jr}$$

Sur une vie prévue de 35 ans, une turbine de 100 MW rapportera environ 1,28 MM\$.

Cela laisse place à l'imagination pour optimiser la machine, sa mise en œuvre et sa fiabilité.

Le système hydroélectrique



1. Les types d'installation

Les aménagements hydroélectriques sont fortement dépendants de la géographie des lieux. Des solutions variées permettent d'optimiser l'exploitation de l'énergie et de répondre aux critères de développement durable. Souvent ces installations hydrauliques ont d'autres vocations en plus de celle de la production électrique. Elles peuvent faire partie d'un système d'irrigation grâce à la retenue ou de navigation fluviale en étant équipées d'écluses.

La composante du système la plus apparente est certainement le barrage principal. En fait, assez souvent, le barrage principal est secondé par une série de digues sur le pourtour du réservoir principale. Par le passé, on a souvent utilisé le béton pour ces travaux, toutefois, on observe une tendance : les barrages et digues modernes sont plus souvent constitués d'enrochement dont les matériaux se trouvent dans l'environnement immédiat. Ces constructions sont mécaniquement plus flexibles que celles en béton et permettent d'accommoder plus facilement les mouvements et déplacements des sols.

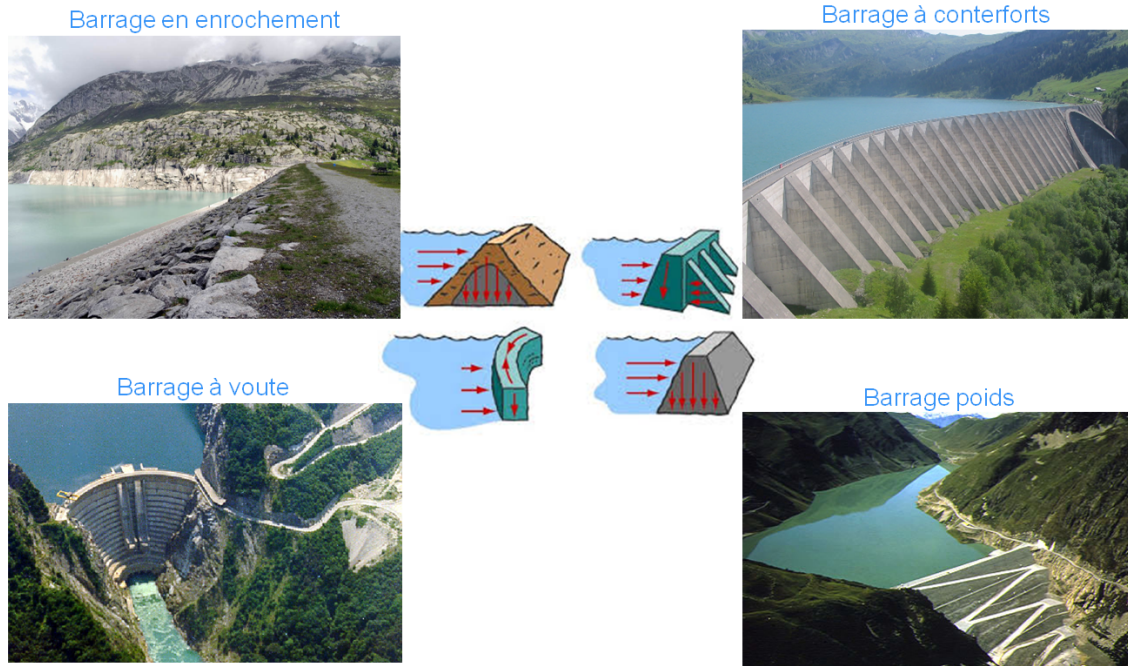
On peut tenter de classer les différentes possibilités d'aménagement hydroélectrique mais de fait, il n'y a pas vraiment de règle et la méthode de construction n'est pas réellement l'aspect le plus fondamental.

Le concept fondamental qui caractérise le mieux l'aménagement hydroélectrique se base sur le mode de production.

- Il y a des **centrales au fil de l'eau**. Dans ce cas, il n'y a peu de capacité de stockage à l'amont du barrage. Ce manque de réservoir oblige à produire de l'énergie en continue pour évacuer l'eau au fur et à mesure qu'il s'accumule à l'amont. On conserve quand même un certain degré de pilotage qui permet de moduler, sur une faible échelle de temps, la production. On parle ici, de quelques heures à quelques jours.
- Les **centrales avec réservoir** ont toute la flexibilité possible pour ajuster la production à la demande. Ces réservoirs se gèrent sur des échelles de temps qui se comptent en années.
- Les **centrales avec réserve pompée**, ne sont pas comme telles des unités de production d'énergie. Elles permettent d'absorber de l'énergie excédentaire disponible sur le réseau et de la restituer lorsqu'il y a un pic dans la demande. C'est l'outil pour accepter les sources d'énergie intermittentes sur le réseau.

Les types de barrage

Voici les principaux types de barrage :



Les principaux types de barrage et digue

Les types de configuration des aménagements hydroélectriques

Les aménagements **au fil de l'eau** n'ont presque pas de capacité de réservoir. Généralement leur chute est faible et le barrage et la centrale sont dans la même structure.

L'opération est continue fournissant de l'énergie de base. Les saisons affectent leur débit.



La centrale Beauharnois comporte 26 turbines Francis et 10 turbines hélices. Elle est au fil de l'eau.

Un aménagement avec **barrage de retenue** permet d'emmagasiner de l'énergie dans le réservoir créé à l'amont. Ce réservoir est géré sur des périodes très longues qui peuvent dépasser l'année. Le barrage et la centrale sont généralement des structures distinctes.

L'opération est variable et donne une grande flexibilité à l'opérateur. Un débit minimum doit toujours être maintenu pour des raisons environnementales.



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

Les **réserves pompées** constituent un autre type d'aménagement permettant d'absorber et de restituer de l'énergie sur le réseau. Typiquement les chutes sont élevées et les centrales souterraines.

Ce type d'équipement donne à l'opérateur du réseau une flexibilité inégalée pour satisfaire la demande.



Nant de Drance en Suisse est une centrale équipée de turbines pompes.

Les grandes centrales

Les grandes centrales marquent l'imagination par leur dimension, leur puissance, la logistique de leur construction et leur impact sur le développement durable.

En voici quelques-unes qui sont mondialement connues.

Centrale des Trois Gorges



« Les 26 générateurs de 700 MW (fournis par les constructeurs européens allemand Voith, autrichien Andritz et le français Alstom) et les huit générateurs (6 × 700 MW, 2 × 50 MW, construction achevée en 2011) de la centrale ont une puissance installée de 22 500 MW, soit 10 % de la capacité installée en Chine (ou sept fois la capacité des centrales hydroélectriques du Rhône (2 950 MW) ou encore l'équivalent d'une vingtaine de tranches de centrales nucléaires). La hauteur de chute est d'environ 90 m. »

Wikipedia

Carte du barrage des Trois Gorges



Les Trois Gorges - vue aérienne



Vue du déversoir et du barrage des Trois Gorges

Centrale d'Itaipu

Barrage	
Type	barrage à contrefort
Hauteur du barrage (lit de rivière)	196 m
Longueur du barrage	7 919 m
Réservoir	
Volume du réservoir	29 000 millions de m ³
Surface du réservoir	135 000 ha
Centrale hydroélectrique	
Hauteur de chute	118 m
Nombre de turbines	20
Type de turbines	Francis
Puissance installée	14 000 MW
Production annuelle	96 400 GWh/an



Carte du barrage d'Itaipu au Brésil

« Les deux dernières des vingt unités de production électrique démarrèrent respectivement en septembre 2006 et mars 2007, amenant la puissance de production à 14 000 MW et achevant la centrale. L'augmentation de la capacité permet désormais de conserver 18 unités en production en permanence pendant que 2 autres sont arrêtées pour maintenance. À cause d'une clause dans le traité signé entre le Brésil, le Paraguay et l'Argentine, le nombre d'unités en production simultanément est limité à 18. »

« La puissance nominale de chaque unité génératrice (turbine + générateur) est de 700 MW. Mais, à cause d'une hauteur d'eau entre le réservoir et le lit de la rivière en aval plus importante aujourd'hui qu'à la conception du barrage, cette puissance est désormais de 750 MW (durant la moitié du temps pour chaque unité génératrice). »

« En comparaison, toute l'eau des chutes d'Iguazú ne fournirait assez de puissance que pour alimenter 2 des 18 unités génératrices du barrage. »

Wikipedia



Centrale d'Itaipu



Barrage d'Itaipu panorama

Aménagement de LG2 avec les centrales de Robert Bourassa et de LG2-A

Centrale Robert-Bourassa	
Type de centrale	Souterraine
Hauteur de chute	137,16 m
Débit d'équipement	4 300 m ³ /s
Nombre de turbines	16
Type de turbines	Francois
Puissance installée	5 616 MW
Production annuelle	42 600 GWh/an
Facteur d'utilisation	63 %

Centrale La Grande-2-A	
Type de centrale	Souterraine
Hauteur de chute	138,5 m
Débit d'équipement	1 620 m ³ /s
Nombre de turbines	6
Type de turbines	Francois
Puissance installée	2 106 MW

Source : SEU 1996, p. 387-405
Cote: 0000000 sur la carte - Québec

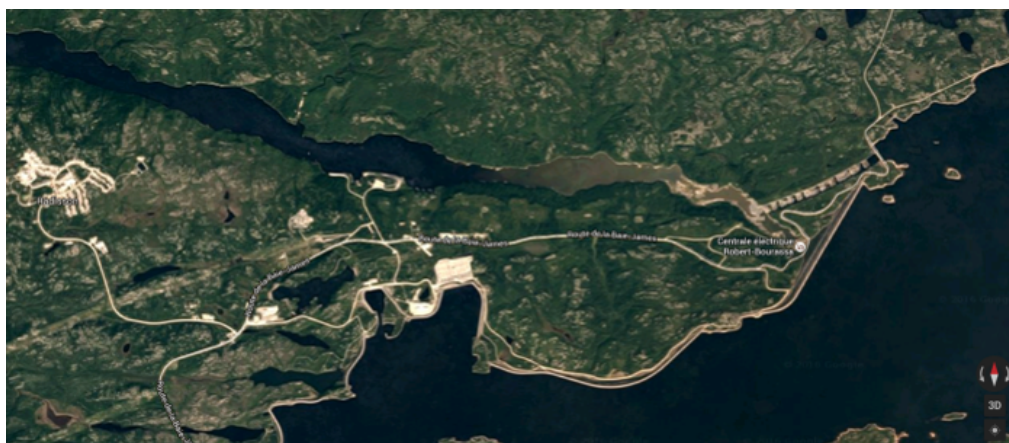


(Voir situation sur carte - Canada)

« La centrale Robert-Bourassa, anciennement nommée centrale La Grande-2 ou LG2, est une centrale hydroélectrique souterraine construite au PK 112, à environ 6 km en aval du barrage. Avec une puissance installée de 5 616 mégawatts, cette centrale est la plus puissante du réseau d'Hydro-Québec. C'est aussi la plus grande centrale hydroélectrique souterraine au monde. Elle a été inaugurée le 27 octobre 1979 à 15 h 33 par le premier ministre du Québec René Lévesque, en présence de 3 000 invités. »

Wikipedia

Carte de la centrale Robert Bourassa à la Baie James



Vue aérienne de l'aménagement de LG2



Vue intérieure de la centrale Robert Bourassa

2. Les types de turbine hydraulique

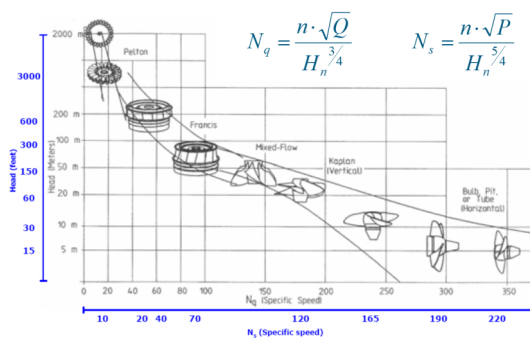
Les types de turbines

Face à la grande variation des

- conditions de chute et débit de même que
- des requis techniques.

Les types de turbines ont été développés pour obtenir des performances optimales.

Observations sur la forme des turbines hydrauliques

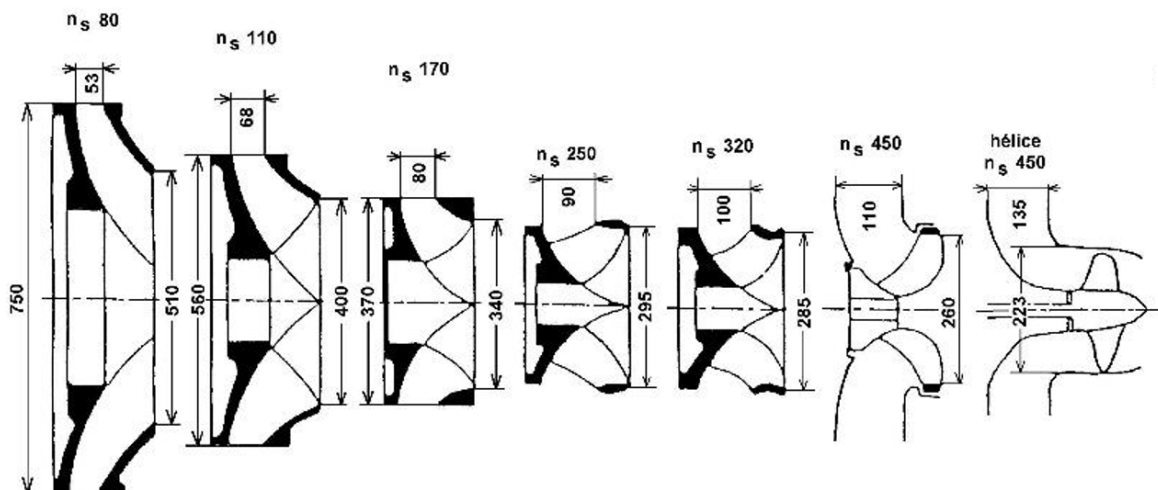


Évolution de la forme des turbines avec la vitesse spécifique et la chute

Au delà de la taille de la machine, la forme constitue le critère de distinction des types de turbine.

On observe que la forme des machines hydrauliques évolue avec la vitesse spécifique (cf. p.46). La vitesse spécifique est un indice de la déviation du fluide en comparant l'effet de la vitesse de rotation de la turbine à l'effet de la courbure de l'aubage.

Plus la chute est grande, plus le fluide contient de l'énergie et plus il doit être dévié. À une chute élevée correspond une vitesse spécifique faible : l'aubage contribue plus alors à la déviation du fluide que la vitesse de rotation.



Évolution de la forme de radial à axial avec la vitesse spécifique

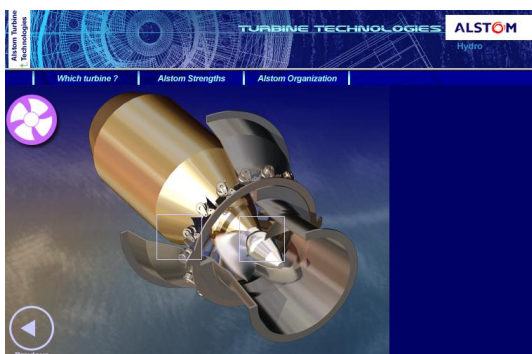


Domaine d'application des différents type de turbine

Remarque

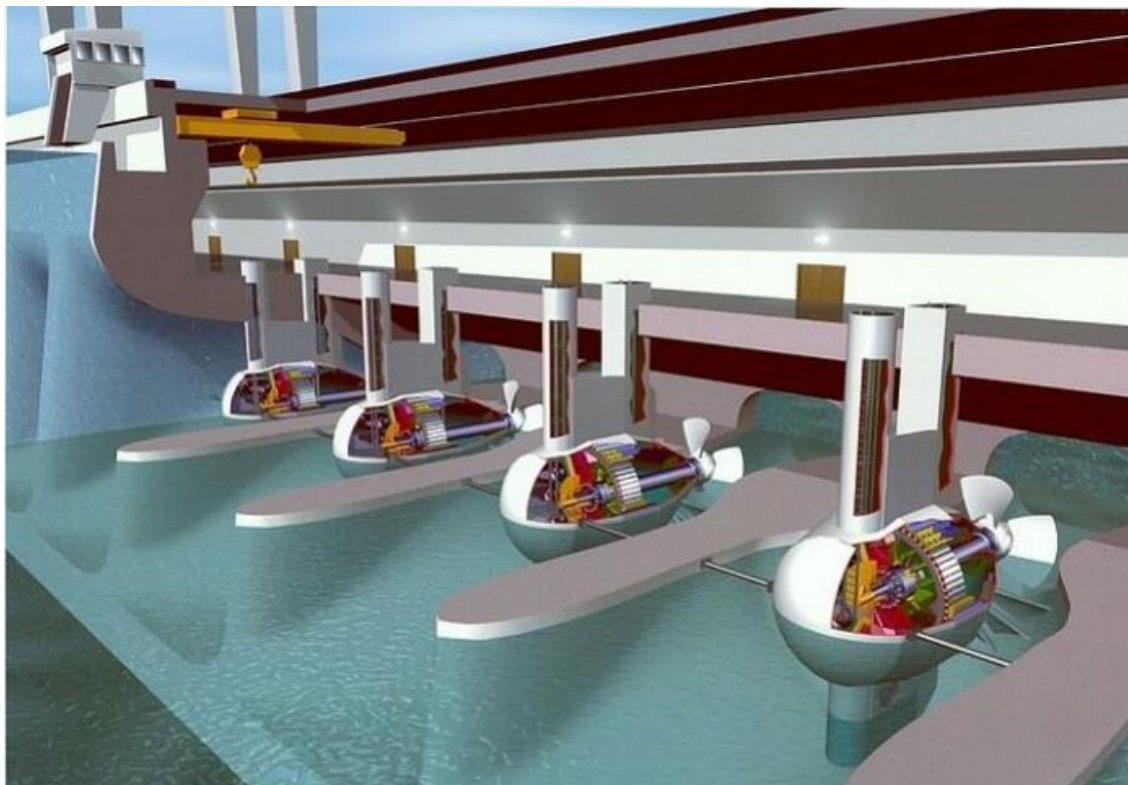
Le paramètre qui influence le plus la forme de la turbine, c'est la chute. Le débit influence la dimension de la turbine.

Bulbe



Le bulbe

Les turbines de type bulbe ont été conçues pour les aménagements au fil de l'eau et de faible chute, généralement de 5 à 15 m. Leur axe est horizontal. Ils ont un peu la configuration d'un sous-marin retenu par la structure de la centrale. L'intérieur du bulbe est considéré pour la sécurité comme un espace confiné. L'enfoncement de la roue par rapport au niveau aval est assez important. Il est de l'ordre de 10 m.



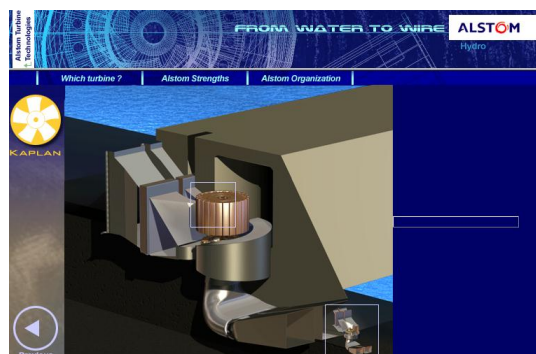
Coupe d'une centrale avec groupe bulbes

Remarque

Le bulbe est une machine très efficace, complexe et chère. Par contre, l'aménagement civil est moindre que pour les autres types de turbine.

L'accès pour la maintenance est difficile.

Kaplan



Turbine Kaplan

La turbine Kaplan est généralement installée sous des chutes variant de 15 à 40 m. L'axe est vertical. L'amenée est souvent intégrée dans une bêche fronto-spirale.

Il s'agit d'une machine assez courante qui présente un enfoncement modéré d'environ 5 m sous le niveau aval. Grâce au pas des pales ajustable, la Kaplan a un rendement très peu variable sur une grande gamme de débit.

Une variante est la turbine hélice dont le pas des pales est fixe. Elle présente un sommet de rendement très élevé mais exploitable sur une très faible plage de débit. Pour cette raison, la turbine de type hélice se retrouve souvent dans des centrales pourvues d'un grand nombre d'unités (autour de 10).



Roue et distributeur de la turbine Kaplan

Remarque

La Kaplan est un type de turbine très répandu pour les basses chutes. La version à pas fixe nommée hélice est très fiable ; surtout trouvée en Amérique du Nord.

Francis

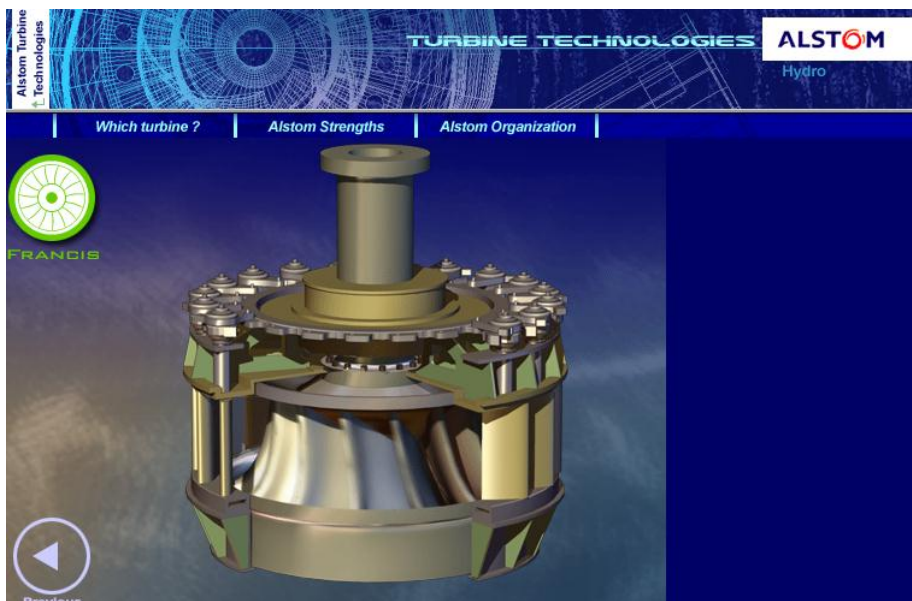


Turbine Francis

Le plus ancien et le plus répandu des types de turbine. La turbine Francis a un très grand domaine d'application.

En axe vertical pour les grandes dimensions, horizontal en mini-hydro où on retrouve plusieurs configurations possibles : roue simple ou roue double(axe horizontal).

C'est une machine robuste et très efficace. Son enfoncement est faible , environ 2 m sous le niveau aval, mais dans certain cas la roue peut être au dessus du niveau aval.

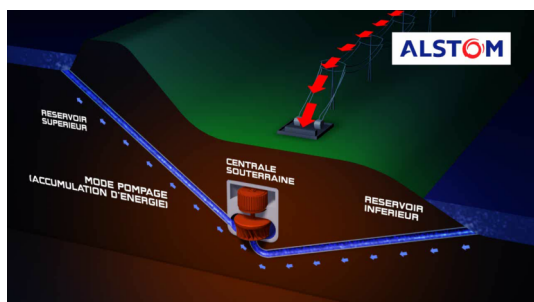


Roue et distributeur de la turbine Francis



Par son efficacité et sa fiabilité, la turbine Francis est le type de turbine le plus utilisé dans le monde.

La turbine-pompe



La turbine-pompe

[cf. Turbine pompe.mp4]



La turbine-pompe fait partie d'une installation d'accumulation d'énergie qui est très efficace. Le cycle combiné pompage et turbinage peut présenter une efficacité globale dépassant les 80%. Sur un réseau, la centrale de pompage turbinage permet d'accepter les sources de production intermittentes tout en garantissant la fiabilité de l'alimentation électrique.

Pelton



Turbine Pelton

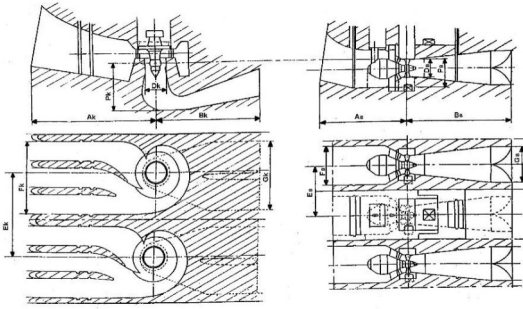
La turbine Pelton est une turbine fonctionnant sous haute chute, plusieurs centaines de mètres. C'est une turbine à action dont le jet est freiné par les augets en rotation, il s'agit d'un écoulement à surface libre. De ce fait, la roue tourne dans l'air et est suspendue au dessus du canal de fuite. Il peut en résulter une perte de chute. L'effort sur chaque auget est le résultat d'une impulsion qui cause une fatigue importante.



On retrouve les turbines Pelton dans les grands massifs montagneux, Rocheuses, Andes, Alpes, Himalaya.

3. Comparaisons entre les types de turbine

Comparaison Kaplan vs bulbe



Pour les turbines de faible chute, la bête est de type fronto-spirale ou n'existe pas.

En basse chute, on a à choisir entre une turbine Kaplan ou bulbe.

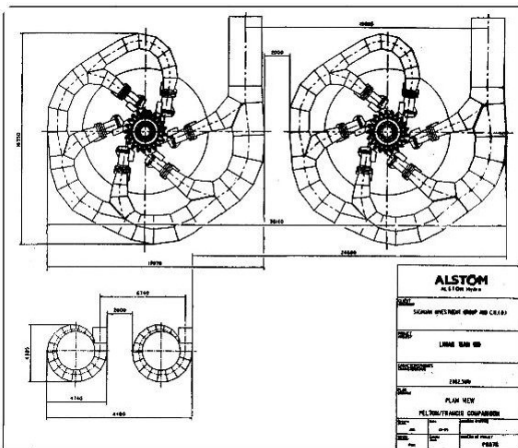
Dans une Kaplan l'écoulement voit successivement 2 virages perpendiculaires.

Le premier est causé par la bête et l'avant distributeur : l'écoulement crée une énergie en rotation.

Le second est le coude dans l'aspirateur pour retourner l'écoulement à la rivière. Ce dernier virage n'existe pas chez le bulbe qui présente environ 1% plus d'efficacité.

Le fond de fouille de l'aspirateur Kaplan nécessite une excavation plus importante.

Comparaison Francis vs Pelton



Encombrement comparé pour des roues de même diamètre

En haute chute, on a à choisir entre turbine Francis ou Pelton.

Sur la Pelton, le collecteur est une pièce qui occupe beaucoup d'espace. La Francis est plus compacte sur ce point.

La Francis demande un enfoncement plus important qui peut entraîner des coûts d'excavation.

Le rendement de la Francis est généralement supérieur.

Exercice : 6



Classer par la production hydroélectrique décroissante.

1. États-Unis
2. Russie
3. Canada
4. Brésil
5. Chine

Réponse : _____

Exercice : 7



Une centrale composée de 3 groupes turbine-alternateur de 95 MW chacun, a rapporté 100 M\$ au cours de la dernière année en vendant son électricité à 0,05\$ du kWh. Quel est son facteur d'utilisation ?

Conclusion



En résumé ...

L'énergie hydraulique et son exploitation par l'hydroélectricité:

- Présente 95% de l'énergie électrique au Québec
- Est en croissance.
- Est la plus avantageuse au niveau:
 1. Des coûts
 2. De l'impact environnemental.
 3. De l'efficacité.
- Sa fiabilité est très importante.
- Chaque projet est unique et optimisé.

Références



Wikipedia

https://fr.wikipedia.org/wiki/Source_d%27%C3%A9nergie_intermittente

Webographie



<http://www.hydroquebec.com/comprendre/hydroelectricite/>

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

<https://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/rapport-developpement-durable.pdf>

<https://www.hydropower.org/publications/2018-hydropower-status-report>

<http://www.ren21.net/>

<https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=105&t=3>

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

Index



Aménagements hydroélectriques p. 23	Francis p. 29	Opération flexible p. 7
Au fil de l'eau p. 23	Gaz à effet de serre p. 14	Pelton p. 29
Barrage p. 23	GES p. 14	Performance environnementale p. 14
Bulb p. 29	Hydraulic Turbine p. 29	Portefeuille énergétique p. 7, 11
Bulbe p. 29	Hydroélectricité p. 7, 17	Production p. 7
Centrale hydroélectrique p. 23	Hydrologie p. 7	Production massive p. 7
Coûts de l'énergie p. 11	Hydrology p. 7	Réserve pompée p. 23
Croissance de l'hydroélectricité p. 11	Hydropower p. 7, 17	Retenue p. 23
Cycle de l'eau p. 7	Hydropower Market p. 17	Robert Bourassa p. 23
Développement durable p. 14	Hydro Powerplant p. 23	Specific speed p. 29, 46
Efficacité énergétique p. 7, 14	Itaipu p. 23	Taux de retour énergétique p. 7, 14
Énergie hydroélectrique p. 7	Kaplan p. 29	Trois Gorges p. 23
EROEI p. 14	Lg2 p. 23	Turbine hydraulique p. 7, 29
Flexibilité p. 7	Marché de l'hydroélectricité p. 17	Vitesse spécifique p. 29, 46

Crédits des ressources



Centrale Brilliant, BC, Canada p. 4

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

Vue en coupe d'une centrale hydroélectrique p. 6

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, © Voith Hydro 29 janvier 2019 publié sur LinkedIn

Le cycle de l'eau p. 7

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>, © Hydro-Québec 2018

<http://www.hydroquebec.com/themes/a-propos/images/illustration-cycle-hydroelectrique.jpg>
<http://www.hydroquebec.com/themes/a-propos/images/illustration-cycle-hydroelectrique.jpg>

Réseau hydrologique de La Grande Rivière p. 8

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

Liste des importantes centrales de production d'énergie toute source confondue p. 8

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>, Wikipedia 2019

https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_plus_grandes_centrales_%C3%A9lectriques_au_monde

p. 9

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

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_hydro%C3%A9lectrique

Au cœur et en synergie avec le réseau, l'hydroélectricité permet de maximiser la capacité de production d'énergie renouvelable p. 10

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

[https://www.vgb.org/hydropower_fact_sheets_2018.html?](https://www.vgb.org/hydropower_fact_sheets_2018.html?dfid=91646)

[dfid=91646](https://www.vgb.org/hydropower_fact_sheets_2018.html?dfid=91646)
https://www.vgb.org/hydropower_fact_sheets_2018.html?dfid=91646

Position des énergies renouvelables dans le portefeuille mondial en 2018 selon REN21 p. 11

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>, https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf

Nouvelles installations hydroélectriques dans le monde pour l'année 2017 p. 11

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

<https://www.hydropower.org/news/2018-hydropower-status-report-shows-record-rise-in-clean-electricity> Hydropower Status Report 2018 pages 42 et 43.

Taux de construction des centrales par an et par source d'énergie p. 12

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/03/Figure-19-Global-power-plant-market-1970_2014.jpg

http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/03/Figure-19-Global-power-plant-market-1970_2014.jpg

Consommation d'électricité mondiale par source d'énergie depuis 1985 p. 12

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, Hélène Baril ; *Le charbon se porte assez bien, merci ; La Presse+Affaires, La planète économique*, 28 octobre 2019.
<https://www.lapresse.ca/affaires/201910/27/01-5247214-la-planete-economique-le-charbon-se-porte-assez-bien-merci.php>

Proportions des sources d'énergie p. 13

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, La presse+ 20170826 *Les deux faces de la voiture électrique* par Vincent Brousseau-Pouliot

Capacité en hydroélectricité et éolienne en 2014 et potentiel hydroélectrique techniquement exploitable. p. 13

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>, <https://webstore.iea.org/energy-policies-of-iea-countries-canada-2015-review> EnergyPoliciesofIEACountriesCanada2015Review.pdf page 212.

Coûts comparés des sources d'énergie renouvelable fin 2018. p. 13

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>, https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf

Évolution dans le temps des rendements des turbines hydrauliques p. 14

<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. 14

<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 p. 15

<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 p. 15

<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.

Comparaison en production de GES des options de production d'électricité suivant les scénarios minimum et maximum p. 16

<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. 16

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

Projection des émissions nettes de GES par Hydro-Québec p. 16

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>,
<https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/emissions-ges.pdf>

La centrale Manic-5 et le barrage Daniel Johnson sont une icône du développement hydroélectrique

p. 18

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>,<http://www.hydroquebec.com/data/metastw/photo-hydro-quebec-2009-253-124080ww.jpg>**Évolution des coûts d'installation, de production et du facteur d'utilisation en hydro** p. 20<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>, IRENA 2018, *Renewable Power Generation Costs in 2018*, <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018><https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>**Inventaire des équipements hydroélectriques vieux de plus de 30 ans dans le monde** p. 20<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, <https://www.andritz.com/products-en/hydro/modernization-renewal><https://www.andritz.com/products-en/hydro/modernization-renewal>**La centrale Les Cèdres en 1910 : classée monument historique en 1984.** p. 21<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>, http://www.museevirtuel.ca/sgc-cms/histoires_de_chez_nous-community_memories/pm_v2.php?id=record_detail&fl=0&lg=Francais&ex=744&rd=199270#**La centrale Les Cèdres en 2009.** p. 21<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>, http://www.museevirtuel.ca/sgc-cms/histoires_de_chez_nous-community_memories/pm_v2.php?id=record_detail&fl=0&lg=Francais&ex=744&hs=0&rd=199272#**Les principaux types de barrage et digue** p. 24<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, © GE 2016 / PEUGER Christian**La centrale Beauharnois comporte 26 turbines Francis et 10 turbines hélices. Elle est au fil de l'eau.**

p. 24

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>,<http://www.hydroquebec.com/data/metastfb/photo-hydro-quebec-2012-250-D6Q9785.jpg>**L'aménagement de LG2 comporte un déversoir et deux centrales (Robert-Bourassa et La Grande-2-A) pour une capacité de 7722 MW.** p. 24<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>,<http://www.hydroquebec.com/production/images/centrales/robertbourassa-01.jpg>**Nant de Drance en Suisse est une centrale équipée de turbines pompes.** p. 25<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, © GE 2016 / PEUGER Christian**Carte du barrage des Trois Gorges** p. 25https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_des_Trois-Gorges**Les Trois Gorges - vue aérienne** p. 26https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_des_Trois-Gorges**Vue du déversoir et du barrage des Trois Gorges** p. 26https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_des_Trois-Gorges**Carte du barrage d'Itaipu au Brésil** p. 27https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_d'Itaipu

Centrale d'Itaipu p. 27

https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_d'Itaipu

Barrage d'Itaipu panorama p. 27

https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_d'Itaipu

Carte de la centrale Robert Bourrassa à la Baie James p. 28

https://fr.wikipedia.org/wiki/Am%C3%A9nagement_Robert-Bourassa

Vue aérienne de l'aménagement de LG2 p. 28

https://fr.wikipedia.org/wiki/Am%C3%A9nagement_Robert-Bourassa

Vue intérieure de la centrale Robert Bourrassa p. 28

https://fr.wikipedia.org/wiki/Am%C3%A9nagement_Robert-Bourassa

Évolution de la forme des turbines avec la vitesse spécifique et la chute p. 29, 47

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>, Inconnue, utilisée par GE/Alstom

Triangle de vitesse dans une roue p. 46

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

Le chiffre de référence pour la dimension de la turbine p. 46

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, CEI60193

Évolution de la forme de radial à axial avec la vitesse spécifique p. 48, 29

Inconnue, utilisée par GE/Alstom

Domaine d'application des différents type de turbine p. 30

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

Le bulbe p. 30

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

Coupe d'une centrale avec groupe bulbes p. 31

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

Turbine Kaplan p. 31

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

Roue et distributeur de la turbine Kaplan p. 32

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

Turbine Francis p. 32

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

La turbine-pompe p. 33

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

Turbine Pelton p. 33

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

Pour les turbines de faible chute, la bête est de type fronto-spirale ou n'existe pas. p. 34

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

Encombrement comparé pour des roues de même diamètre p. 34

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

Contenus annexes

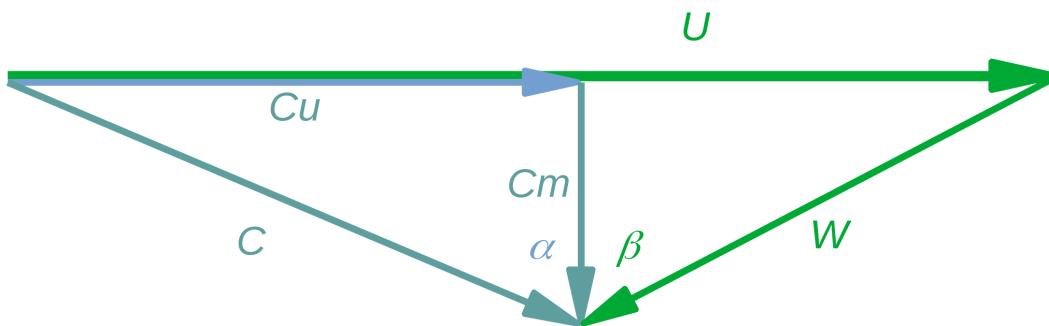


1. La vitesse spécifique

Expression de la similitude en fonction des paramètres hydrauliques

Le retour au triangle de vitesse nous amène les conditions de conservation des angles dans le repère tournant : la roue. Entre 2 roues géométriquement similaires, en chaque point la vitesse relative W doit être en similitude. Cela nous amène à une expression de la condition de conservation des angles :

$(Cu - U)/Cm$ exprime le même triangle de vitesse entre 2 points sur 2 roues similaires.



Triangle de vitesse dans une roue

- 26 - 60193 © CEI-1999

Donc,

- Les ratios Cu/Cm et U/Cm doivent être conservés entre les 2 turbines similaires.
- On observe que Cu et Cm sont liées entre elles par une constante et à \sqrt{H} par la relation de Combe-Rateau : $Cu = Cm * \tan(\alpha) = constante * \sqrt{H}$
- Alors que de façon indépendante U est lié à ω et à la géométrie par : $U = \omega D/2$

Et Cm est liée à la géométrie par:

$$C_m = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} = constante * \sqrt{H} \quad (cf. p.48)$$

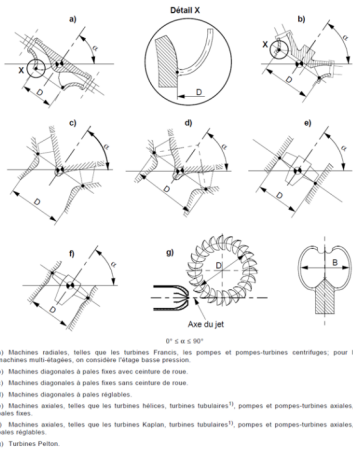


Figure 3 - Diamètre de référence et largeur d'auget

Le chiffre de référence pour la dimension de la turbine

On utilise habituellement, le diamètre D à la sortie des aubes en mode turbine comme référence de dimension.

Entre 2 machines, considérons le triangle des vitesses à la sortie et au diamètre maximum : (cf. p.48)

D'une part :

$$\frac{Q'}{Q''} = \frac{C_m' \pi \left(\frac{D'}{2}\right)^2}{C_m'' \pi \left(\frac{D''}{2}\right)^2} = Q^* = \sqrt{H^*} L^{*2} \rightarrow L^* = \sqrt{\frac{Q^*}{\sqrt{H^*}}}$$

D'autre part :

$$\frac{U' C_m''}{C_m' U''} = \frac{n' \pi D'}{n'' \pi D''} \frac{1}{\sqrt{H^*}} = \frac{n^* L^*}{\sqrt{H^*}} = \text{constante} = n^* \frac{\sqrt{Q^*}}{H^{*0,75}}$$

Dans cette dernière équation en imposant le ratio des dimensions L^* comme étant une fonction du débit et de la chute, on contraint le respect du triangle des vitesses.

Ce qui nous amène à la définition de la vitesse spécifique.

La vitesse spécifique



Selon CEI6193, la définition de la vitesse spécifique est :

$n_{QE} = \frac{n \sqrt{Q}}{E^{0,75}}$ (cf. p.49) qui est une valeur adimensionnelle. Elle correspond à la vitesse de rotation en tps de la turbine pour une énergie de 1 Joule et un débit de 1 m³/s.

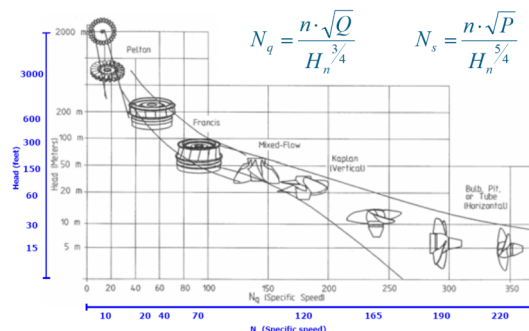
- La vitesse spécifique permet de classer les turbines sur la base de leur chute, débit et vitesse de rotation. Pour une turbine donnée, elle se calcule généralement au point de meilleur rendement.
- La vitesse spécifique exprime la contribution à la déformation du filet fluide de la vitesse de rotation par rapport à la forme de l'aube .
- Elle sert à bâtir des statistiques pour faire le choix d'une machine.
- Peut s'exprimer aussi en fonction de la puissance : $n_s = \frac{n_{tpm} \sqrt{P_m}}{H^{1,25}}$ (cf. p.49)
- Il existe plusieurs formulations dimensionnelles.
 - Attention aux unités.
 - Parfois, le point de fonctionnement considéré n'est pas celui de meilleur rendement, cela peut être la pleine charge ou autre chose.
 - P peut s'exprimer en kW, HP (746 watts), CV (736 watts).
 - n peut s'exprimer en tpm ou tps.

Évolution de la forme des turbines en fonction de la vitesse spécifique

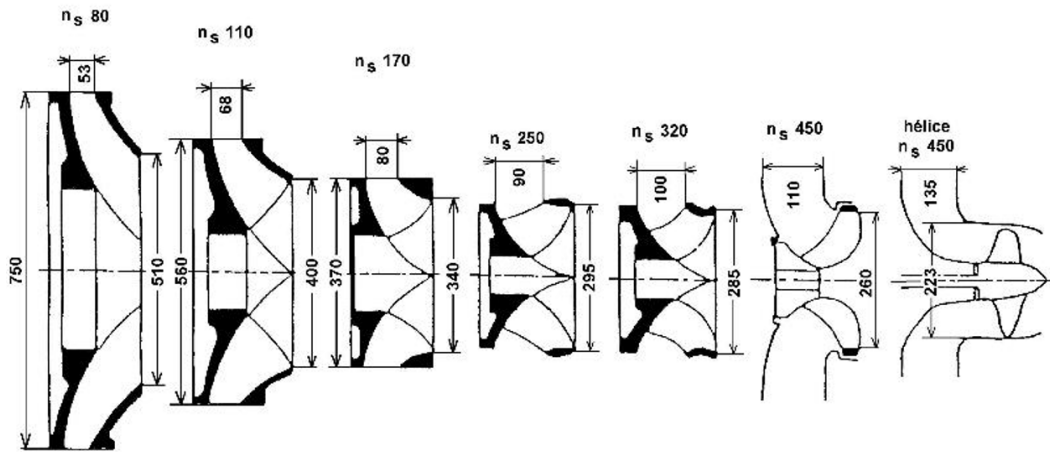


La vitesse spécifique permet de suivre l'évolution de certains paramètres:

- Forme
- Rendement
- Cavitation



Évolution de la forme des turbines avec la vitesse spécifique et la chute



Évolution de la forme de radial à axial avec la vitesse spécifique

Remarque

Le système de la vitesse spécifique est unidimensionnel et donc très simple, faute d'information sur le comportement en détail, il permet néanmoins de classer les turbines. Toutefois, pour l'hydraulicien, il manque de l'information. En effet, comme on l'a vu, la turbine répond en performance à deux intrants : le débit et l'énergie. En plus, sa configuration géométrique est basée sur ces 2 critères. On a donc besoin d'un système à 2 dimensions pour permettre à l'hydraulicien de mieux analyser la turbine pour optimiser son déploiement.

2. Équation de la vitesse débitante d'une turbine

$$C_m = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \text{constante} * \sqrt{H}$$

$C_m \rightarrow$ composante débitante de la vitesse du fluide en m/s

$A \rightarrow$ est l'aire en m^2

$D \rightarrow$ est le diamètre de référence (roue) en m

$H \rightarrow$ est la chute exprimée en m et équivalente à un niveau d'énergie

3. Similitude exprimée par la vitesse spécifique

D' une part :

$$\frac{Q'}{Q''} = \frac{C_m' \pi \left(\frac{D'}{2}\right)^2}{C_m'' \pi \left(\frac{D''}{2}\right)^2} = Q^* = \sqrt{H^*} L^{*2} \rightarrow L^* = \sqrt{\frac{Q^*}{\sqrt{H^*}}}$$

D' autre part :

$$\frac{U' C_m''}{C_m' U''} = \frac{n' \pi D'}{n'' \pi D''} \frac{1}{\sqrt{H^*}} = \frac{n^* L^*}{\sqrt{H^*}} = \text{constante} = n^* \frac{\sqrt{Q^*}}{H^{*0,75}}$$

$Q \rightarrow$ est le débit volumique exprimé en m^3/s

$C_m \rightarrow$ composante débitante de la vitesse du fluide en m/s

$D \rightarrow$ est le diamètre de référence (roue) en m

$H \rightarrow$ est la chute exprimée en m et équivalente à un niveau d'énergie

L^* → est un rapport d'échelle entre 2 turbines

U → vitesse tangentielle du solide en m/s

n → vitesse de rotation en tps

4. Vitesse spécifique selon CEI60193

$$n_{QE} = \frac{n\sqrt{Q}}{E^{0,75}}$$

n_{QE} → vitesse spécifique selon CEI (-)

n → vitesse de rotation en tps

Q → est le débit volumique exprimé en m³/s

E → est l'énergie massique en J/kg ou en m²/s²

5. Vitesse spécifique

$$n_s = \frac{n_{tpm}\sqrt{P_m}}{H^{1,25}}$$

n_s → vitesse spécifique unités variables

n_{tpm} → vitesse de rotation en tpm

P_m → Puissance mécanique produite par la turbine en watts

H → est la chute exprimée en m et équivalente à un niveau d'énergie