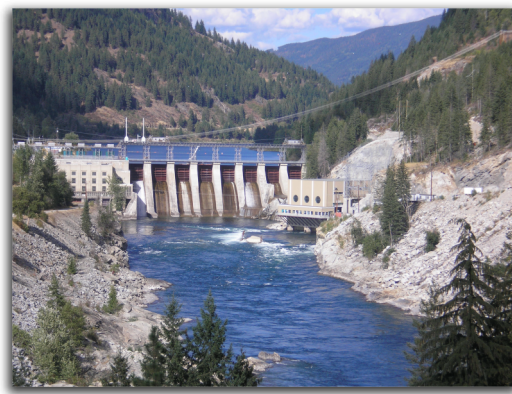


ENR811 Hydraulique et hydroélectricité - Mise en oeuvre

© Michel Sabourin 2021

27 octobre 2021



ENR811 Énergie hydraulique

Table des matières

Objectifs	3
Introduction	4
I - Hydraulique et hydroélectricité - Mise en oeuvre	5
1. Aménagement typique d'une centrale hydroélectrique.....	5
2. Les caractéristiques de l'hydroélectricité.....	6
3. L'hydroélectricité dans le portefeuille énergétique mondial	11
4. Le contexte d'affaire en hydroélectricité	14
II - Exercice : Exercices	19
III - Exercice : Ordonnement des mots	20
IV - Exercice : Question nécessitant un calcul	21
Solutions des exercices	22
Glossaire	24
Références	25
Webographie	26
Index	27
Crédits des ressources	28

Objectifs



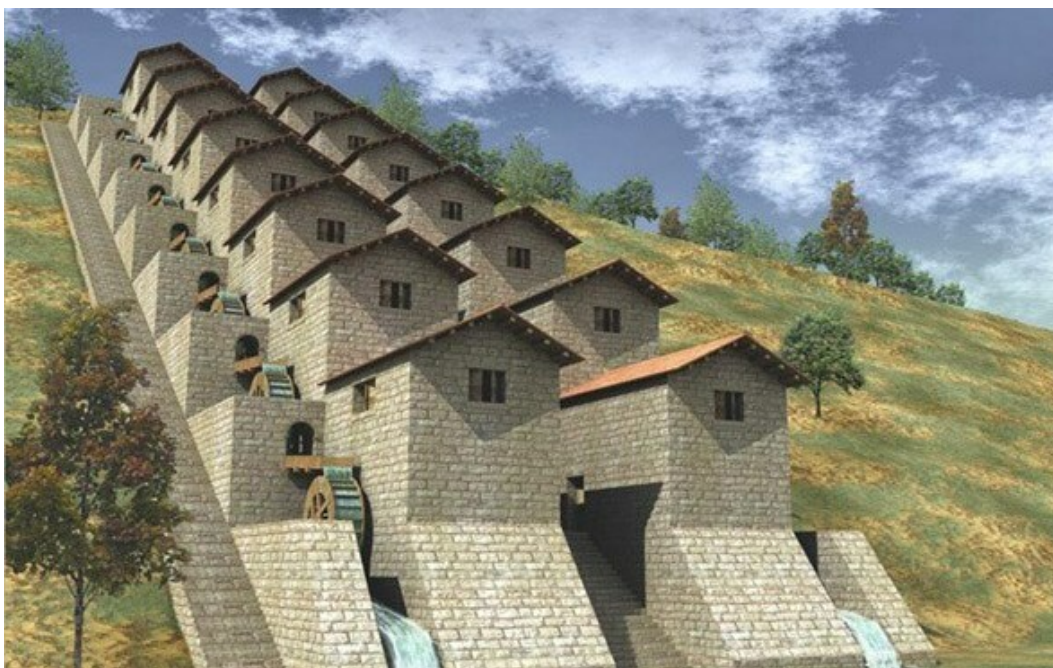
Cette présentation a pour but de :

- 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



À la recherche de moyens pour produire de l'énergie, l'hydraulique est apparue très tôt comme une source d'énergie qui est très accessible et nécessite peu de moyens pour l'exploiter. De fait, on utilise cette énergie depuis des milliers d'années. Les Moulins de Barbegal¹ sont un bel exemple d'un ensemble industriel exploitant l'énergie hydraulique il y a presque deux mille ans. On dit qu'il s'agit de la plus importante installation hydraulique de l'antiquité.



Les moulins de Barbegal près de Fontvieille en France datent du deuxième siècle.

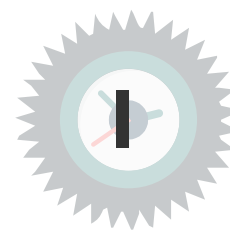
Évidemment, la révolution industrielle a apporté son lot d'innovations et a permis de multiplier l'échelle de son application, de sorte qu'aujourd'hui, les centrales d'énergie les plus puissantes au monde sont hydrauliques et hydroélectriques. Tout en conservant ses caractéristiques d'origine, elle représente toujours une proportion importante de l'énergie exploitée dans le monde.

Comme tout développement humain et toute technologie, les aménagements hydroélectriques ont un impact sur l'environnement. Dans un objectif de développement durable, à partir des besoins exprimés et prévisibles en énergie, l'hydroélectricité lorsqu'elle est disponible est souvent favorisée par rapport aux autres sources d'énergies.

Dans les prochains paragraphes, les caractéristiques de l'hydroélectricité seront présentées. On exposera ensuite, les impacts environnementaux comparés de différentes sources d'énergie et on complètera par une introduction à la science de l'hydraulique et à l'ingénierie des turbines hydrauliques.

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

Hydraulique et hydroélectricité - Mise en oeuvre



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.

1. Aménagement typique d'une centrale hydroélectrique

Aménagement typique d'une centrale hydroélectrique

Voici une coupe d'une centrale hydroélectrique typique.

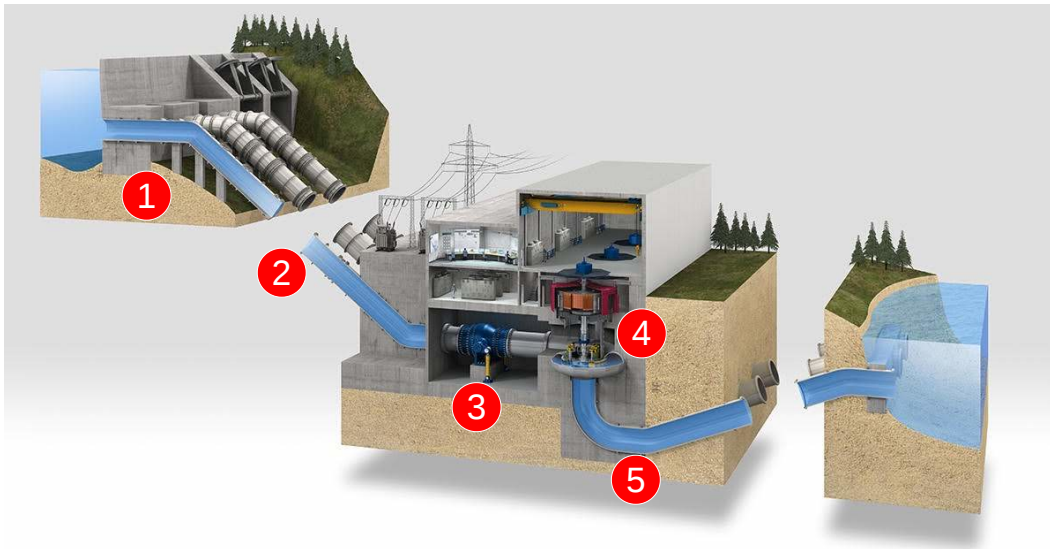
Entre les *biefs* ^{p.24} amont et aval, en suivant l'écoulement de l'eau, on y observe :

1. Une prise d'eau normalement équipée d'une vanne activée par des treuils ou des servomoteurs et précédée d'une grille à débris.
2. On a ensuite la conduite forcée qui amène l'eau à la centrale. Le long de la conduite forcée, on peut rencontrer des cheminées d'équilibre qui ne sont pas montrées sur l'illustration.
3. Suit de la vanne de garde qui est un organe de sécurité localisé près de la turbine.
4. Enfin, il y a la turbine surmontée de l'alternateur qui constitue le groupe de production électrique.
5. L'eau est ensuite évacuée par l'aspirateur qui peut joindre un canal de fuite pour le retour à la rivière.

L'aménagement des biefs amont et aval peut nécessiter des travaux de génie civil important comme des digues, des écluses pour la navigation, des canaux pour l'irrigation.

On ajoute à cela des aménagements permanents comme des postes électriques de transformation, des lignes de transports, des routes, des entrepôts, des ateliers, des logements, parfois des villages complets, des aéroports.

Pendant la construction, il y a des aménagements temporaires qui incluent des villages complets, des carrières, des usines à béton.



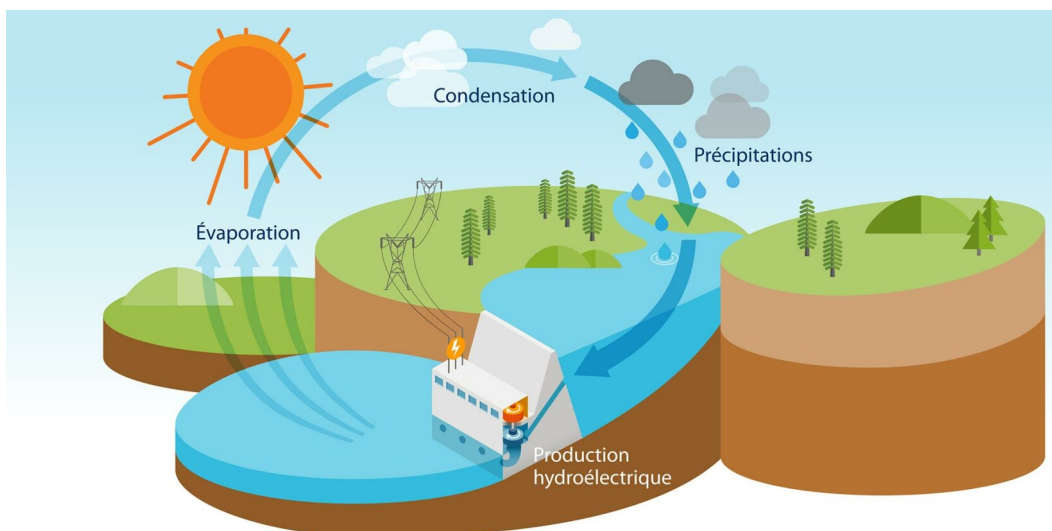
Vue en coupe d'une centrale hydroélectrique

2. Les caractéristiques de l'hydroélectricité

Une source d'énergie renouvelable



Fondamental

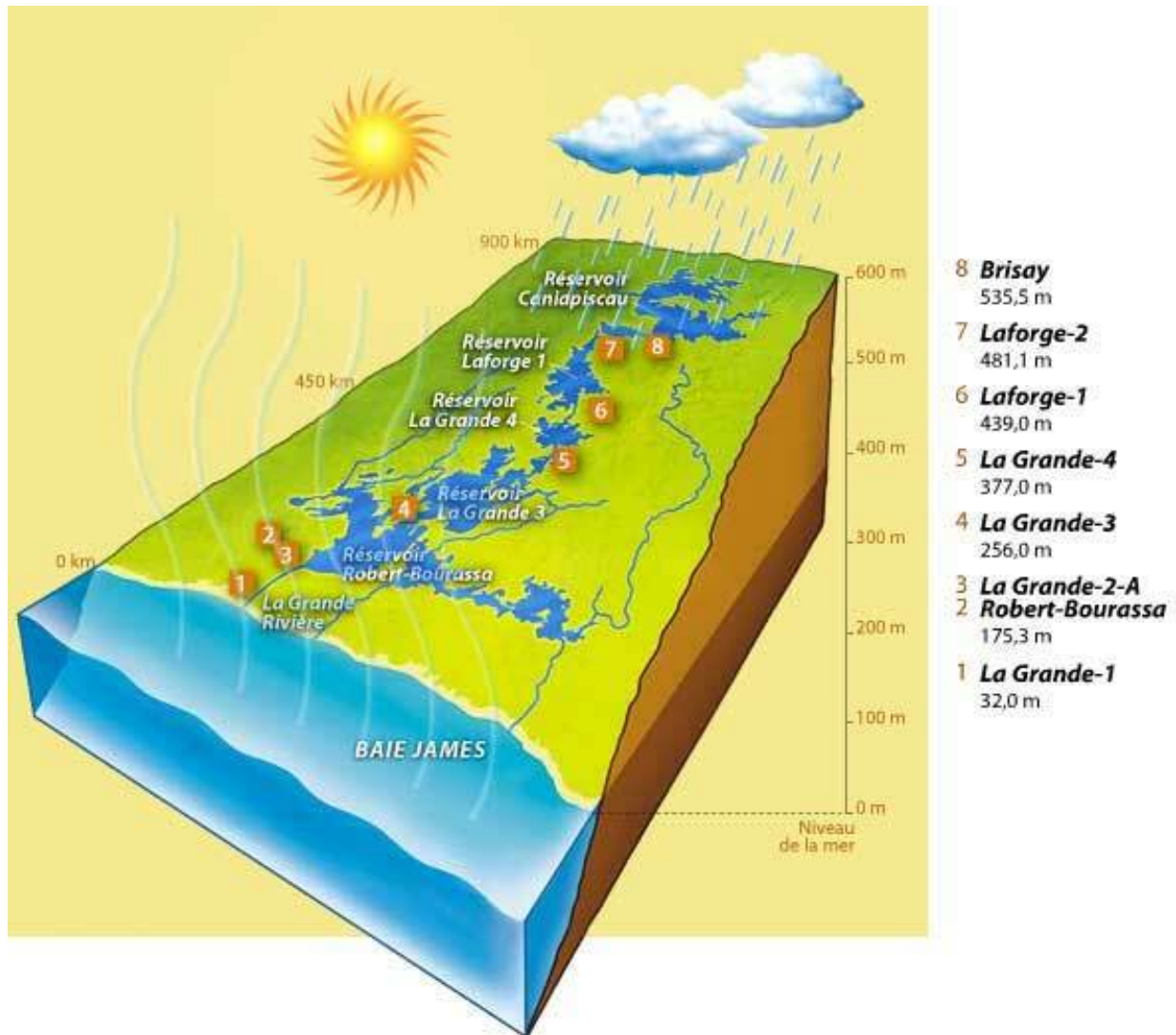


Le cycle de l'eau

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. *Avantages de l'hydroélectricité p.26*

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. À peu de chose près, le bief aval d'une centrale devient le bief amont de la centrale suivante sur la rivière et ainsi on exploite tout le potentiel hydraulique de toute la rivière par une succession de barrages et centrales.

Une capacité de production massive d'énergie



Fondamental

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. *IHA 2018 Hydropower Status Report p.26*
- 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)	Energie produite annuellement (TWh)	Sources d'énergie	Ref.
1	Barrage des Trois-Gorges	Chine	30° 40' 15" N, 111° 00' 05" E	22 500	98,8 (2014)	Hydroélectrique	6, 7, 8
2	Barrage d'Itaipu	Brésil Paraguay	25° 24' 31" S, 54° 35' 21" O	14 000	98,03 (2013)	Hydroélectrique	6, 9, 10, 11
3	Barrage de Xiluodu	Chine	28° 15' 33" N, 103° 38' 59" E	13 860	55,2 (2015)	Hydroélectrique	6, 12
4	Barrage de Belo Monte	Brésil	3° 07' 48" S, 51° 46' 34" O	11 233	40,04 (estimation)	Hydroélectrique	13, 14
5	Barrage de Guri	Venezuela	7° 45' 59" N, 62° 59' 57" O	10 235	47 (en moyenne)	Hydroélectrique	6, 15
6	Barrage de Tucuruí	Brésil	3° 49' 53" S, 49° 38' 36" O	8 370	21,4 (1999)	Hydroélectrique	6, 9, 16
7	Centrale nucléaire de Kashivazaki-Kanwa	Japon	37° 25' 45" N, 138° 35' 43" E	7 965	33,3 (2011)	Nucléaire	À l'arrêt depuis l'accident de Fukushima
8	Barrage de Grand Coulee	États-Unis	47° 57' 23" N, 118° 58' 56" O	6 809	21 (2008)	Hydroélectrique	6, 21, 22
9	Barrage de Xiangjiaba	Chine	28° 38' 38,1" N, 104° 23' 35,5" E	6 448	30,7 (2015)	Hydroélectrique	6, 23, 24
10	Barrage de Longtan	Chine	25° 01' 37,2" N, 107° 02' 30,5" E	6 426	18,7	Hydroélectrique	6, 16, 25
11	Barrage de Salans-Chouchensk	Russie	52° 49' 31" N, 91° 22' 15" E	6 400	24,9 (2013)	Hydroélectrique	6, 26
12	Centrale nucléaire de Bruce	Canada	44° 19' 31" N, 81° 35' 58" O	6 300	45 (2013)	Nucléaire	27, 28
13	Barrage de Krasnolask	Russie	55° 56' 05" N, 92° 17' 40" E	6 000	23,0 (2014)	Hydroélectrique	29
14	Centrale nucléaire de Yangjiang	Chine	21° 42' 30" N, 112° 15' 40" E	6 000		Nucléaire	
15	Centrale nucléaire d'Ulchin	Corée du Sud	37° 05' 34" N, 128° 23' 01" E	5 881	48,16	Nucléaire	30, 31
16	Centrale nucléaire de Yonggwang	Corée du Sud	35° 24' 54" N, 126° 25' 26" E	5 875	47,62	Nucléaire	30, 32
17	Barrage de Naozhadu	Chine	29° 38' 39" N, 100° 25' 48" E	5 850	23,9 (estimation)	Hydroélectrique	33
18	Centrale nucléaire de Zaporizja	Ukraine	47° 30' 44" N, 34° 35' 09" E	5 700	48,16 (en moyenne)	Nucléaire	34
19	Centrale Robert-Bourassa	Canada	53° 47' 43" N, 77° 26' 26" O	5 616	26,5	Hydroélectrique	
20	Centrale thermique de Shoaba	Arabie saoudite	20° 40' 48" N, 39° 31' 24" E	5 600	42 (estimation)	Fouil	35

Liste des plus grandes centrales électriques au monde selon Wikipédia 2020

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 2019

Région	Puissance totale fin 2019 (GW)	dont pompage-turbinage GW	Ajouts 2019 ^{h 4} GW	Production 2019 (TWh)	Part 2019
Afrique	37,3	3,4	0,91	138	3,2 %
Asie méridionale et centrale	151,8	7,5	2,34	504	11,7 %
Asie orientale et Pacifique	486,8	68,3	6,46	1 594	37,0 %
Europe	251,4	54,9	0,68	653	15,2 %
Amérique du Nord et centrale	204,3	23,0	0,07	731	17,0 %
Amérique du Sud	176,3	1,0	5,17	686	15,9 %
Monde	1 307,9	158,0	15,6	4 306	100 %
Principaux pays producteurs					
Chine	356,4	30,3	4,17	1 302	30,2 %
Canada	81,4	0,2	-	398	9,2 %
Brésil	109,1	0,03	4,92	387	9,0 %
États-Unis	102,8	22,9	0,08	274	6,4 %
Russie	49,9	1,4	0,46	190,3	4,4 %
Inde	50,1	4,8	0,15	162,1	3,8 %
Norvège	32,7	1,4	0,13	125,8	2,9 %
Turquie	28,5	-	0,22	87,1	2,0 %
Japon	49,9	27,6	-	86,7	2,0 %
Venezuela	15,4	-	-	72,0	1,7 %
Suède	16,5	0,1	0,02	64,8	1,5 %
France	25,6	5,8	0,02	63,6	1,5 %
Viêt Nam	16,8	-	0,08	52,0	1,2 %
Colombie	11,9	-	0,08	51,5	1,2 %
Paraguay	8,8	-	-	49,3	1,1 %
Italie	22,6	7,7	-	48,0	1,1 %
Autriche	14,5	5,6	-	42,7	1,0 %
Suisse	16,9	3,0	-	40,3	0,9 %

Source des données : International Hydropower Association^{h 5}.

Puissance installée et production d'hydroélectricité en 2019 selon Wikipédia

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 45% supérieure. Le facteur d'utilisation ou facteur de charge peut être calculé ainsi :

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

À l'échelle des pays, les États-Unis ont un facteur d'utilisation de 30% alors que le Canada est à 56%. 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 2019, les chiffres du rapport d'*Hydro-Québec sur le développement durable* Hydro-Québec - Rapport sur le développement durable 2018 p.26 permettent de calculer un facteur d'utilisation de 53,7% 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.

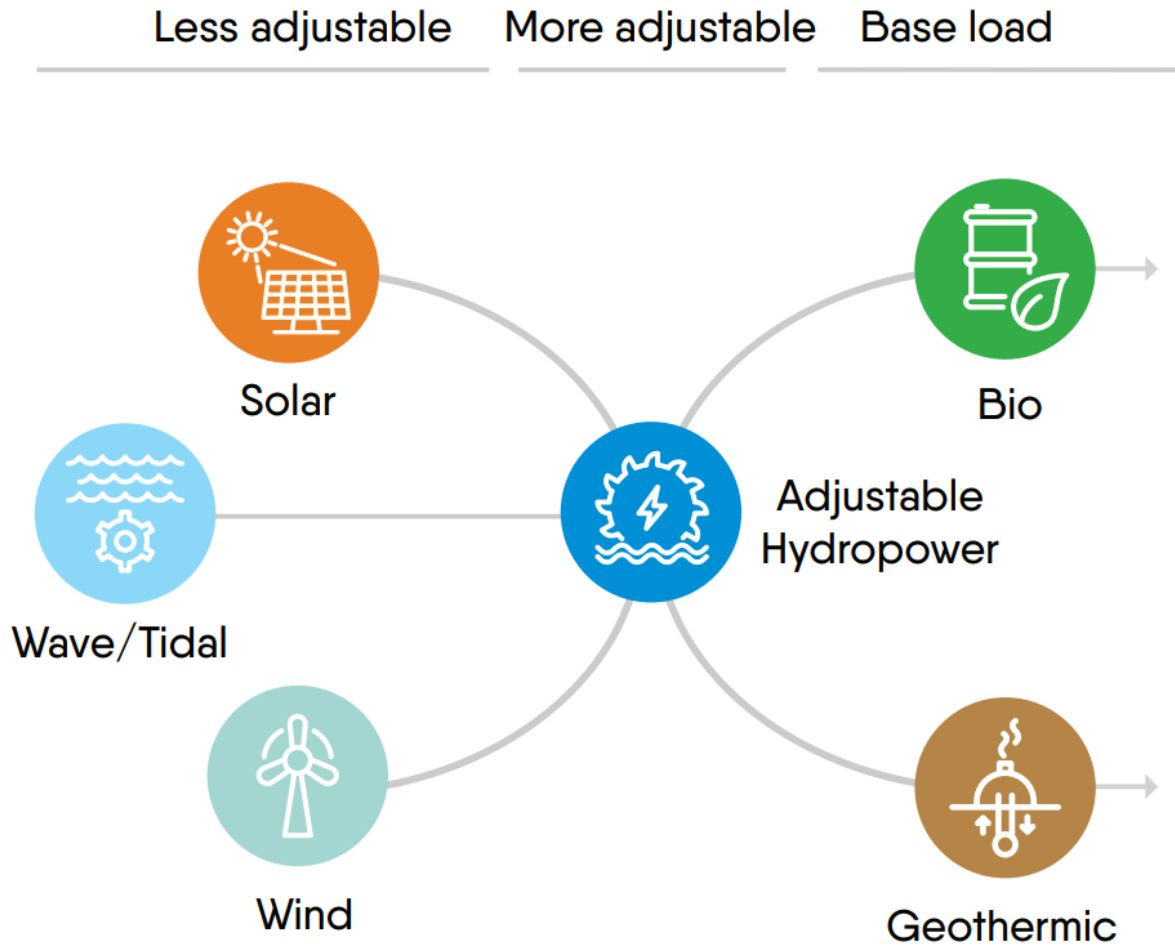
« Le stockage en barrages hydroélectriques est une approche économiquement viable pour atténuer l'intermittence des sources d'énergie renouvelables. Cette approche (le pompage-turbinage) est exploitée actuellement en Europe du Nord, où le Danemark utilise les barrages scandinaves afin de gérer la variabilité de ses ressources éoliennes. » Wikipedia p.25

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.

Par sa flexibilité d'exploitation due aux grands réservoirs et aux installations de pompage-turbinage, l'hydroélectricité 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.

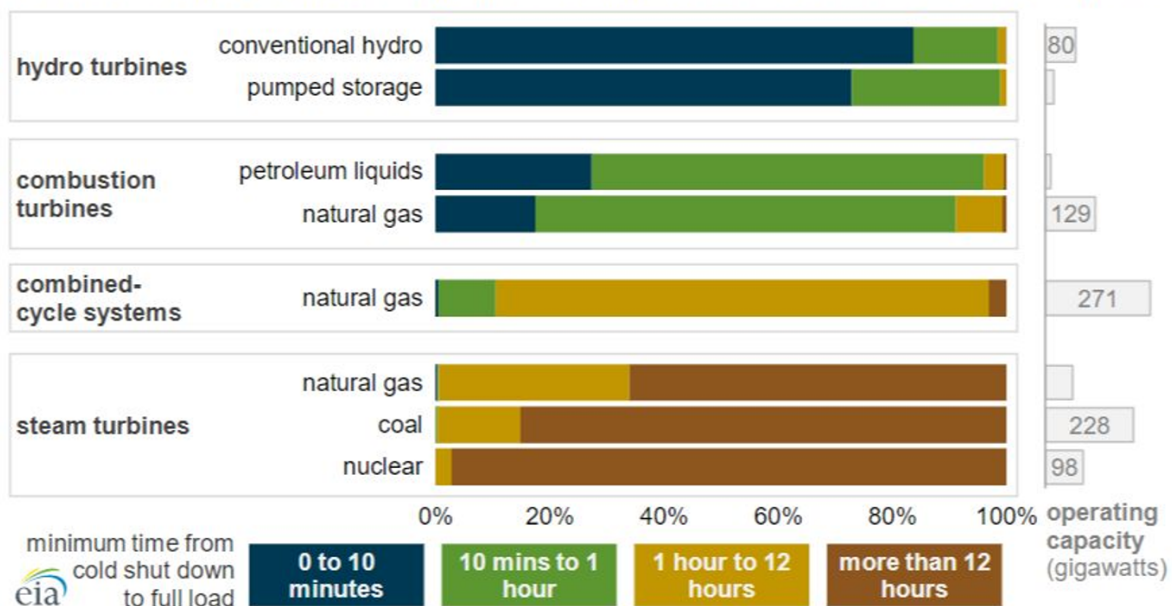
Sur un réseau électrique, l'hydroélectricité est un atout incontournable.



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

Sur le graphe suivant, les statistiques sur les délais de démarrage montrent clairement l'avantage de l'hydroélectricité sur les autres sources d'énergie.

U.S. electric generating capacity by minimum time from cold shut down to full load (2019)

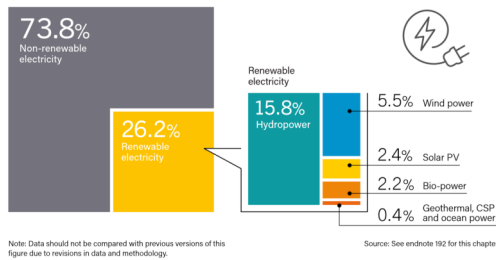


Source: U.S. Energy Information Administration, *Annual Electric Generator Inventory*
 Note: Only technology/fuel combinations with at least 10 gigawatts of operating capacity are shown.

Statistiques sur les délais de Démarrage à froid - Pleine charge

3. L'hydroélectricité dans le portefeuille énergétique mondial

Portefeuille mondial fin 2018



Positionnement de l'hydroélectricité

Selon *REN21* *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century* p.26, 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.

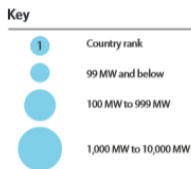
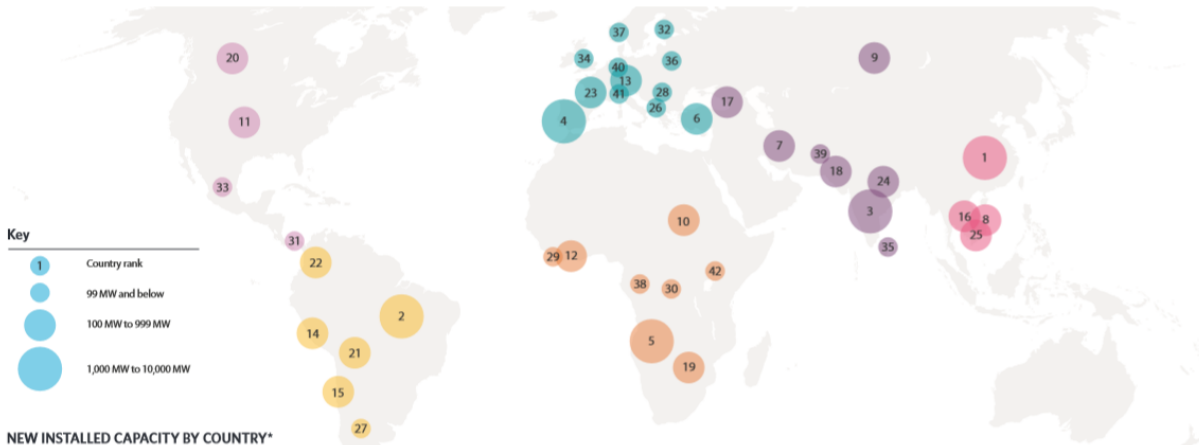
Position des énergies renouvelables dans le portefeuille mondial en 2018 selon REN21

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?



NEW INSTALLED CAPACITY BY COUNTRY*

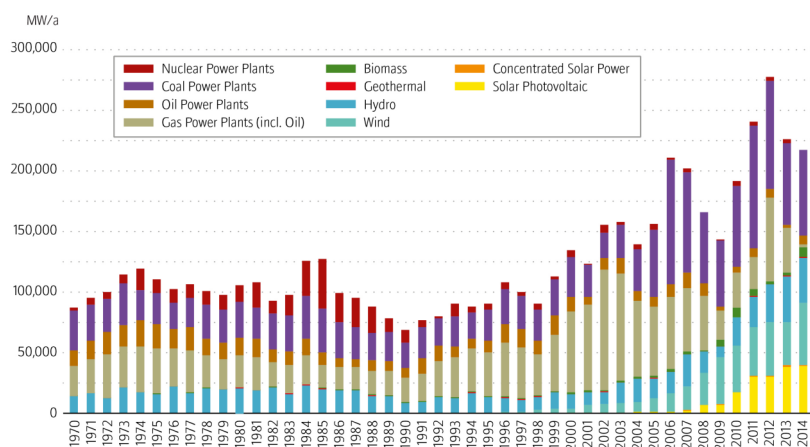
Rank	Country	Capacity added (MW)	Rank	Country	Capacity added (MW)
1	China	9,120	11	United States	283
2	Brazil	3,376	12	Côte d'Ivoire	275
3	India	1,908	13	Switzerland	265
4	Portugal	1,050	14	Peru	200
5	Angola	1,018	15	Chile	181
6	Turkey	592	16	Laos	166
7	Iran	520	17	Georgia	163
8	Vietnam	373	18	Pakistan	157
9	Russia	364	19	Zimbabwe	152
10	Sudan	320	20	Canada	139

Rank	Country	Capacity added (MW)	Rank	Country	Capacity added (MW)
21	Bolivia	120	32	Finland	38
22	Colombia	119	33	Mexico	33
23	France	112	34	United Kingdom	32
24	Nepal	100	35	Sri Lanka	29
25	Cambodia	100	36	Belarus	24
26	Albania	75	37	Norway	20
27	Argentina	72	38	Congo	19
28	Serbia	68	39	Afghanistan	19
29	Liberia	66	40	Austria	14
30	Democratic Republic of the Congo	61	41	Romania	12
31	Panama	51	42	Uganda	12

* including pumped storage

Nouvelles installations hydroélectriques dans le monde pour l'année 2017

Global power plant market, 1970 – 2014

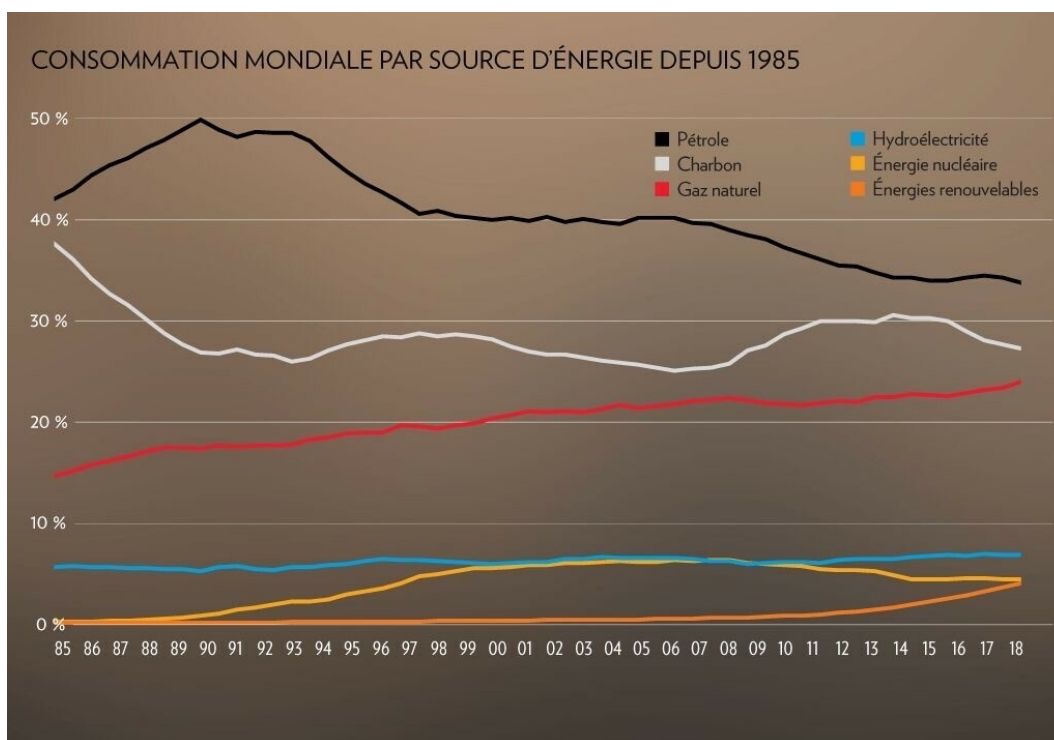


Renewables Global Futures Report Great debates towards 100% renewable energy



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

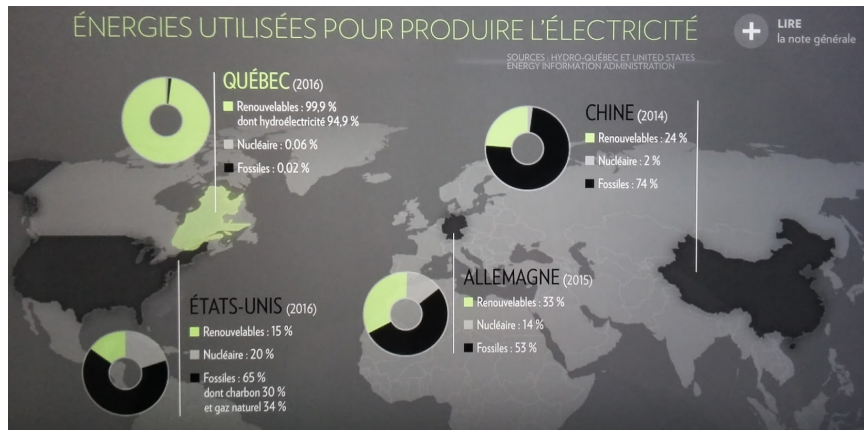


Consommation d'électricité mondiale par source d'énergie depuis 1985

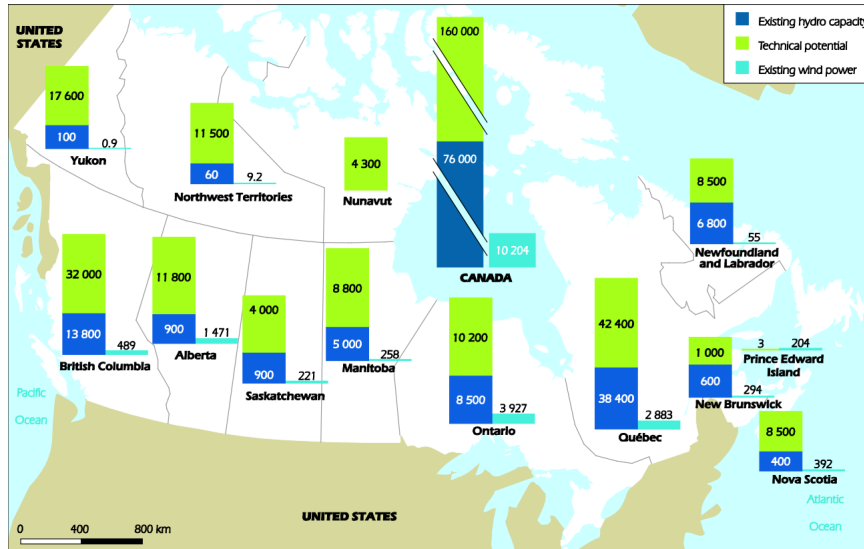
La croissance de la production hydroélectrique se maintient au fil des ans et est assez constante. Alliée aux autres sources d'énergie renouvelable, ces dernières semblent amorcer une croissance exponentielle qui se heurte à une forte résistance des énergies non-renouvelables qui dominent toujours la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

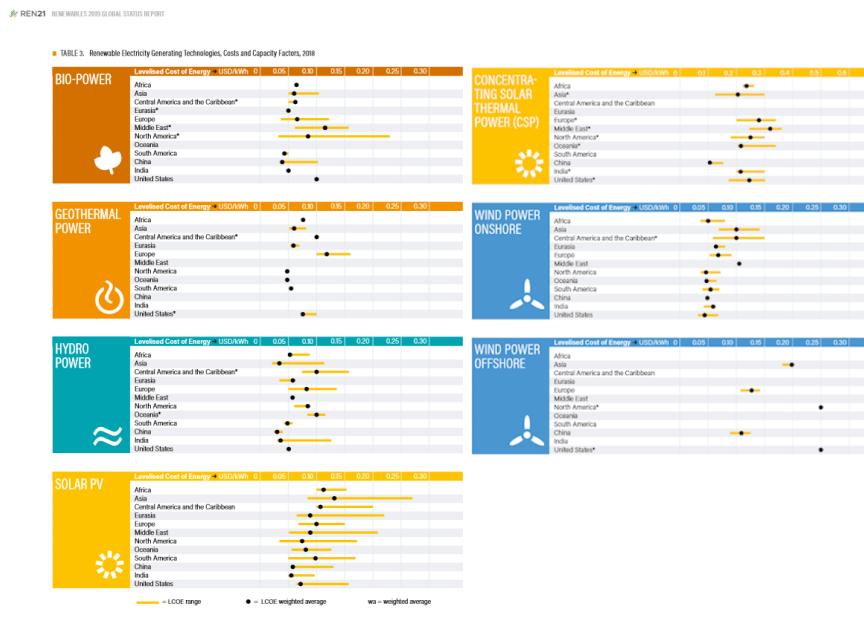


Capacité en hydroélectricité et éolienne en 2014 et potentiel hydroélectrique techniquement exploitable.

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.

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 compatibles 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 itchytophiles ("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 :

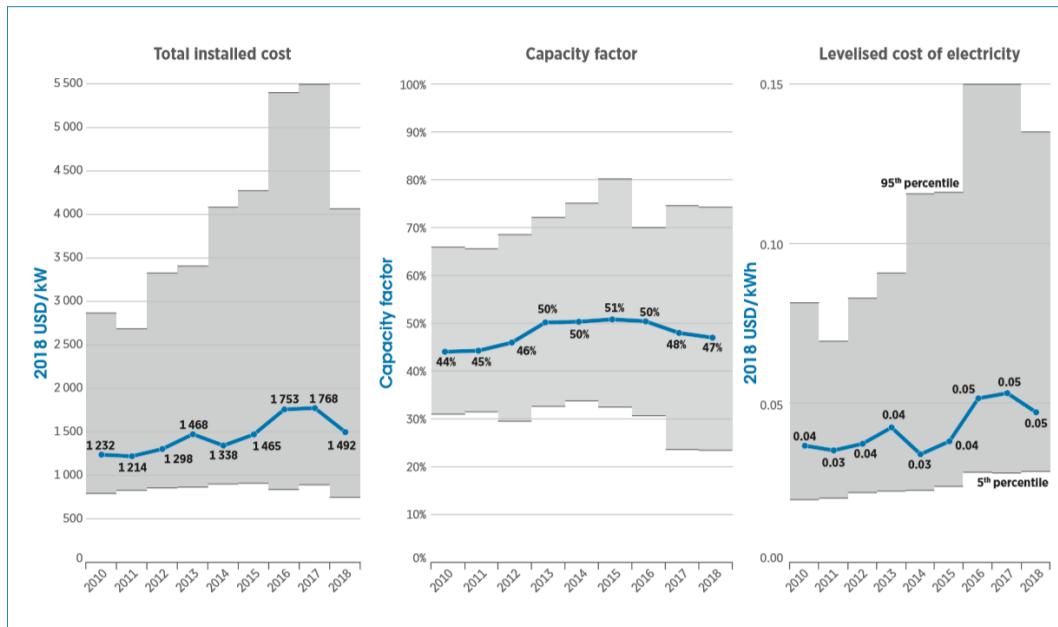
- Le choix du type de machine peut être fortement influencé par l'expérience des intervenants. Certains opérateurs vont préférer les turbines hélices aux Kaplan à cause de leur fiabilité et de leur très haut rendement. Alors, que d'autres préféreront les Kaplan qui donnent plus de souplesse dans leur 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 poisson, 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

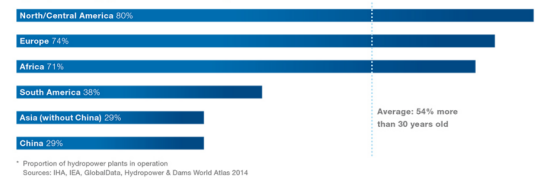


Lorsqu'on regarde les coûts des nouveaux projets, on observe une tendance à la hausse que ce soit au niveau des coûts d'installation ou des coûts de l'électricité produite. Le lien entre les deux est le facteur d'utilisation. Ceci évidemment concerne les nouvelles installations. Toutefois, pour les économies 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 60%, et un prix de vente de 0,07\$ du kilowatt-heure.

Une journée de production =

$100 \text{ MW} * 1000 \text{ KW/MW} * 60\% * 24 \text{ heures/ jour} * 0,07\$/\text{KW-hre} = \sim 100\,000 \text{ \$/jr}$

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.

L'hydraulique est une énergie facilement exploitable et qui est assez répandue. C'est souvent la première source d'énergie exploitée sur un territoire. Chaque projet est unique et les plus grandes centrales d'énergie dans le monde sont hydroélectriques.

Exercice : Exercices

[solution n°1 p. 22]



1-1

Laquelle des caractéristiques suivantes représente le moins l'hydroélectricité?

- Les plus grandes centrales de production d'électricité, tout carburant confondu, sont hydroélectriques.
- Les coûts de développement des projets hydroélectriques sont parmi les plus élevés.
- L'empreinte écologique est faible.
- Il y a plus de contraintes à l'opération par rapport aux autres sources d'énergies.
- Aucune de ces réponses.

1-2

En hydroélectricité chaque projet est unique et les turbines sont faites sur mesure et ne sont pas un standard produit en série.

Laquelle des raisons suivantes n'explique pas cet état de fait.

- La géographie et les conditions hydrauliques.
- L'opération des turbines.
- L'analyse des coûts sur l'ensemble du projet.
- La culture des intervenants.
- Toutes ces réponses expliquent l'unicité des projets.

Exercice : Ordonnement des mots

[solution n°2 p. 22]



Pour l'année 2019, classer par la production hydroélectrique décroissante.

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

Réponse : _____

Exercice : Question nécessitant un calcul

[solution n°3 p. 23]



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 ?

Solutions des exercices



Solution n°1

[exercice p. 19]

1-1

Laquelle des caractéristiques suivantes représente le moins l'hydroélectricité?

- Les plus grandes centrales de production d'électricité, tout carburant confondu, sont hydroélectriques.
- Les coûts de développement des projets hydroélectriques sont parmi les plus élevés.
- L'empreinte écologique est faible.
- Il y a plus de contraintes à l'opération par rapport aux autres sources d'énergies.
- Aucune de ces réponses.

1-2

En hydroélectricité chaque projet est unique et les turbines sont faites sur mesure et ne sont pas un standard produit en série.

Laquelle des raisons suivantes n'explique pas cet état de fait.

- La géographie et les conditions hydrauliques.
- L'opération des turbines.
- L'analyse des coûts sur l'ensemble du projet.
- La culture des intervenants.
- Toutes ces réponses expliquent l'unicité des projets.

Solution n°2

[exercice p. 20]

Pour l'année 2019, classer par la production hydroélectrique décroissante.


Chine

Canada

Brésil

États-Unis

Russie

 En production comptabilisés en TWh, les pays énoncés sont classés en ordre décroissant.



Puissance installée et production d'hydroélectricité en 2019

Région	Puissance totale fin 2019 (GW)	dont pompage-turbinage GW	Ajouts 2019 ^{h4} GW	Production 2019 (TWh)	Part 2019
Afrique	37,3	3,4	0,91	138	3,2 %
Asie méridionale et centrale	151,8	7,5	2,34	504	11,7 %
Asie orientale et Pacifique	486,8	68,3	6,46	1 594	37,0 %
Europe	251,4	54,9	0,68	653	15,2 %
Amérique du Nord et centrale	204,3	23,0	0,07	731	17,0 %
Amérique du Sud	176,3	1,0	5,17	686	15,9 %
Monde	1 307,9	158,0	15,6	4 306	100 %
Principaux pays producteurs					
Chine	356,4	30,3	4,17	1 302	30,2 %
Canada	81,4	0,2	-	398	9,2 %
Brésil	109,1	0,03	4,92	387	9,0 %
États-Unis	102,8	22,9	0,08	274	6,4 %
Russie	49,9	1,4	0,46	190,3	4,4 %
Inde	50,1	4,8	0,15	162,1	3,8 %
Norvège	32,7	1,4	0,13	125,8	2,9 %
Turquie	28,5	-	0,22	87,1	2,0 %
Japon	49,9	27,6	-	86,7	2,0 %
Venezuela	15,4	-	-	72,0	1,7 %
Suède	16,5	0,1	0,02	64,8	1,5 %
France	25,6	5,8	0,02	63,6	1,5 %
Viêt Nam	16,8	-	0,08	52,0	1,2 %
Colombie	11,9	-	0,08	51,5	1,2 %
Paraguay	8,8	-	-	49,3	1,1 %
Italie	22,6	7,7	-	48,0	1,1 %
Autriche	14,5	5,6	-	42,7	1,0 %
Suisse	16,9	3,0	-	40,3	0,9 %

Source des données : International Hydropower Association^{h5}.

Puissance installée et production d'hydroélectricité en 2019 selon Wikipédia

Solution n°3

[exercice p. 21]

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 ?

0,8



La production théorique maximale annuelle est de :

$$\{3 * \{95\ 000\ kw\} * 8760\ heures\} / \text{année} = 2\ 496\ 600\ 000\ kWh$$

La production réelle a été de :

$$\{100\ 000\ 000\ \$\} / \{0,05\ \$ / kWh\} = 2\ 000\ 000\ 000\ kWh$$

Le facteur d'utilisation est donc de :

$$\{2\ 000\ 000\ 000\ kWh\} / \{2\ 496\ 600\ 000\ kWh\} = 0,8$$

Glossaire



Bief

Section à niveau constant d'un cours d'eau comprise entre deux obstacles comme des chutes, des digues, des écluses, etc.

Références



Wikipedia

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

Webographie



[Avantages de l'hydroélectricité] <http://www.hydroquebec.com/comprendre/hydroelectricite/>

[Hydro-Québec - Rapport sur le développement durable 2018]

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

[IHA 2018 Hydropower Status Report] <https://www.hydropower.org/publications/2018-hydropower-status-report>

[Renewable Energy Policy Network for the 21st Century] <http://www.ren21.net/>

Index



Coûts de l'énergie.....	11
Croissance de l'hydroélectricité	11
Cycle de l'eau.....	6
Efficacité énergétique	5
Énergie hydroélectrique	5
Flexibilité	6
Hydroélectricité.....	6, 14
Hydrologie.....	6
Hydrology.....	6
Hydropower.....	6, 14
Hydropower Market.....	14
Marché de l'hydroélectricité.....	14
Opération flexible.....	6
Portefeuille énergétique	5, 11
Production.....	6
Production massive	6
Taux de retour énergétique	5
Turbine hydraulique.....	5

Crédits des ressources



Les moulins de Barbegal près de Fontvieille en France datent du deuxième siècle. p. 4

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, <https://www.lemondedelenergie.com/le-mix-energetique-et-les-moulins-de-barbegal/2017/10/03/>

Vue en coupe d'une centrale hydroélectrique p. 6

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/fr/>, © Michel Sabourin 2021 adapté de © Voith Hydro 29 janvier 2019 publié sur LinkedIn

Le cycle de l'eau p. 6

<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. 7

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

Liste des plus grandes centrales électriques au monde selon Wikipédia 2020 p. 8

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>,
https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_plus_grandes_centrales_%C3%A9lectriques_au_monde

Puissance installée et production d'hydroélectricité en 2019 selon Wikipédia p. 8, 23

<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?dfid=91646
https://www.vgb.org/hydropower_fact_sheets_2018.html?dfid=91646

Statistiques sur les délais de Démarrage à froid - Pleine charge p. 10

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/4.0/fr/>,
<https://www.flickr.com/photos/124982865@N08/50619890688/>

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

La centrale Manic-5 et le barrage Daniel Johnson sont une icône du développement hydroélectrique p. 15

<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. 17

<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. 17

<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. 17

<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. 18

<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#