

Les enjeux de l'hydroélectricité et des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) dans la transition énergétique

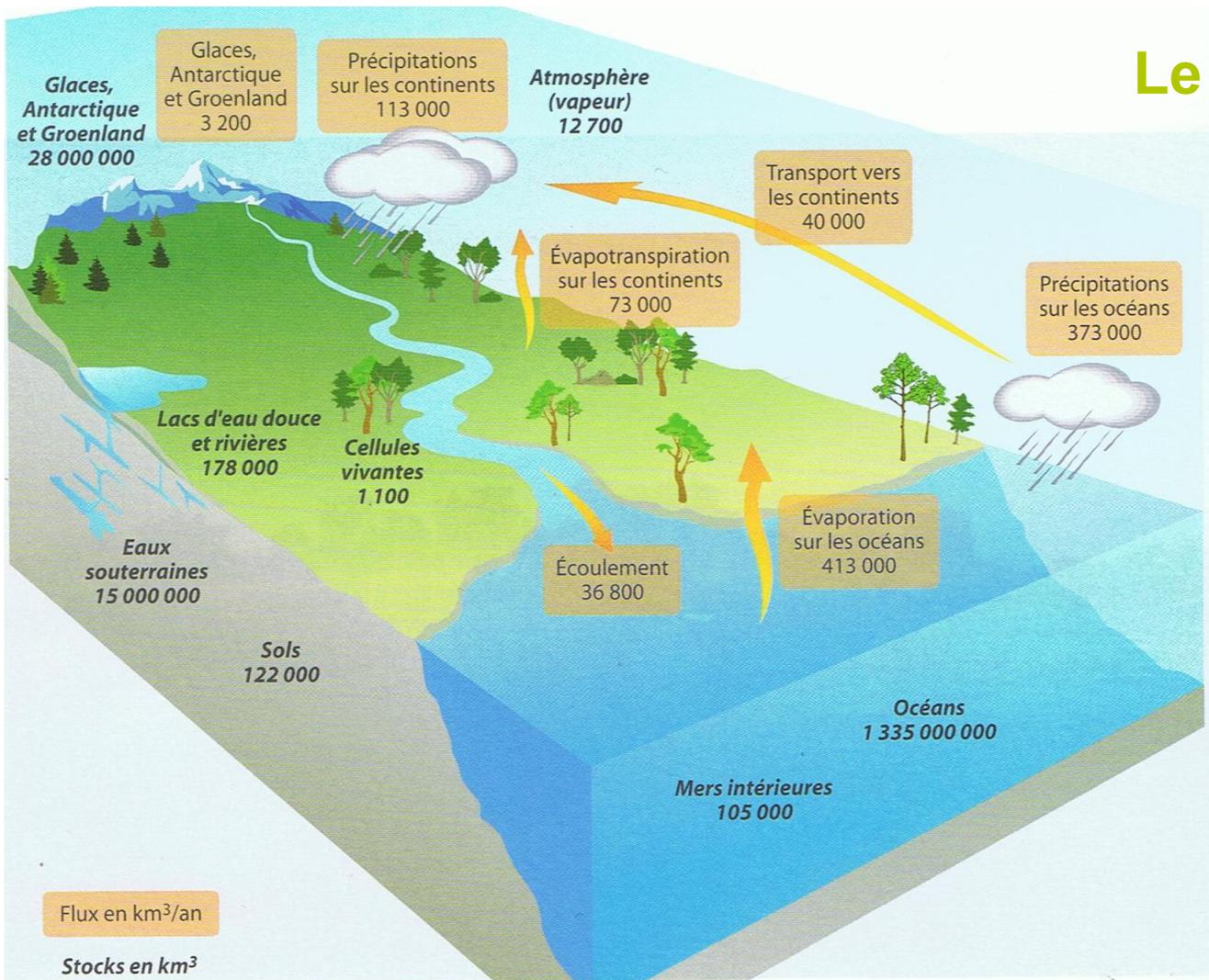
Jean-Paul CHABARD

Président de la Société
Hydrotechnique de France
Professeur à l'École des Ponts et
Chaussées



La ressource en eau et le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau



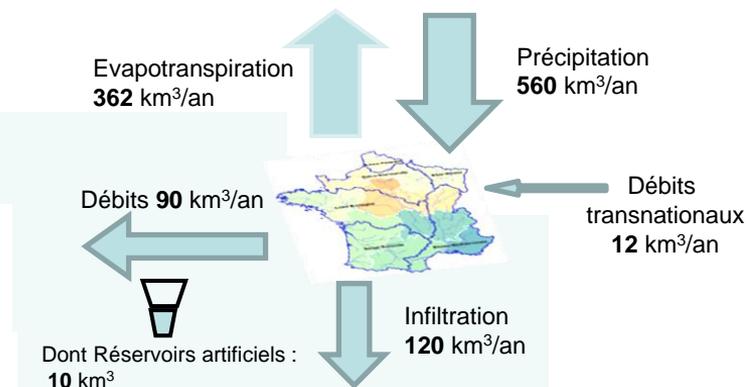
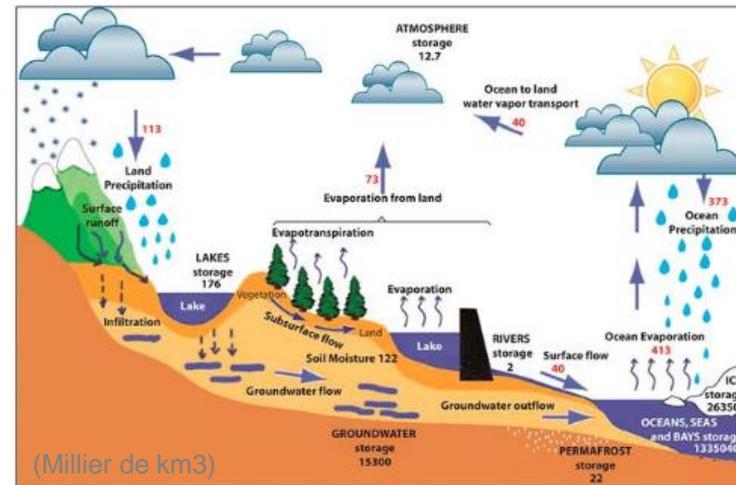
La ressource en eau

Cycle de d'eau

- Transfert et stockage d'eau entre les « réservoirs d'eau » sur Terre à l'échelle du globe
- Principal moteur : Energie du soleil qui favorise évaporation et transpiration

La ressource en eau en France en moyenne par année

- 560 km³ (Précipitation) + 12 km³ (Apports transnationaux)
- 362 km³ consommés par évapotranspiration (~60% des précipitations)
- = 90 km³ d'écoulement de surface et 120 km³ infiltré dans les nappes = la ressource en eau disponible pour les usages
- Capacité de stockage artificielle : 10 km³
- Ratio de 3230 m³ par habitant de ressource en eau renouvelable



Les prélèvements et les consommations

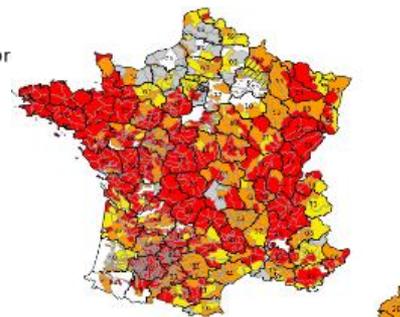
Les prélèvements et consommation dominés par l'agriculture et l'énergie

- **33 km³ de prélèvement** (27 km³ dans les eaux de surface et 6 km³ dans les nappes)
- **5,3 km³** de ces prélèvements sont **consommés**
- Le secteur énergétique est le premier préleveur (57 %)
- L'agriculture est le premier consommateur (48 %)

| | Prélèvements | Consommation |
|-------------|--------------------|---------------------|
| | 33 km ³ | 5,3 km ³ |
| Agriculture | 15% | 48% (79% été) |
| Industrie | 10% | 6%(2% été) |
| Tertiaire | 18% | 24% (10% été) |
| Energie | 57% | 22% (9% été) |

La période estivale (JJA) concentre les tensions

- Écoulement = 15 % du volume annuel
- Consommation = 60% du volume annuel porté principalement par l'agriculture irriguée (79 %)
- Restrictions pour maintenir des débits pour les milieux (Biodiversité, Objectifs de bon état (DCE)) plus fréquentes

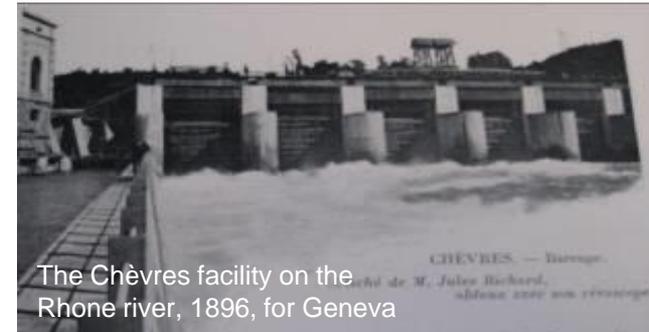
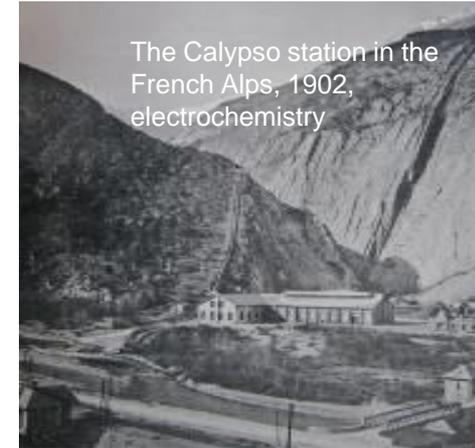


A la fin août 2022, 78 départements français sont placés en crise

Les aménagements hydrauliques

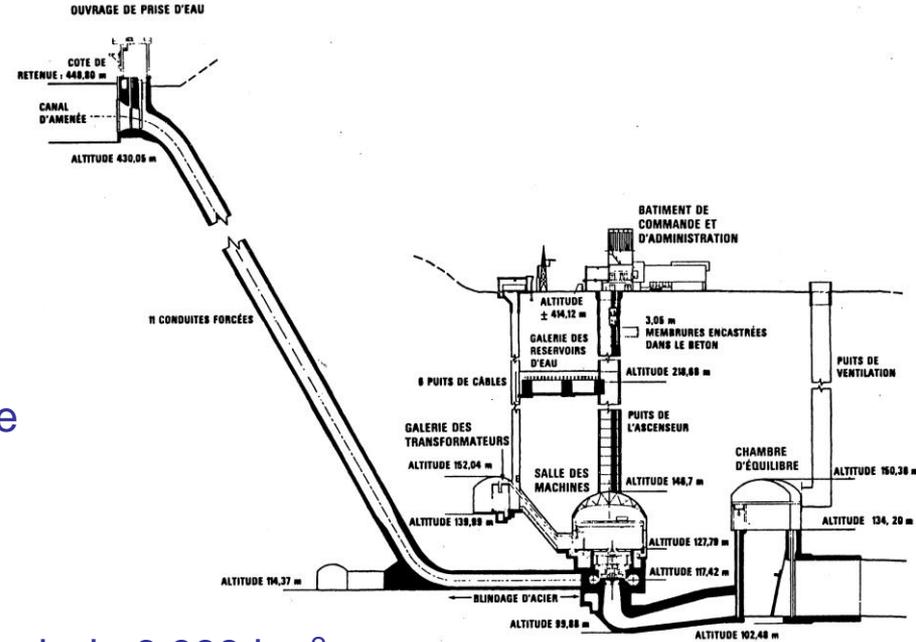
Le modèle d'activité au début du XX^e siècle

- **L'électrochimie et l'électrométallurgie**
- **L'électrification des villes**
 - De couples grande centrale / ville :
Niagara-Buffalo ; Paderne-Milan; Chèvres-Genève;
Kembs-Mulhouse...
 - Le développement des réseaux d'électricité et leurs interconnexions ont contribué à la mise en commun des ressources à l'échelle du continent.
- **Deux grands types d'installations étaient déjà disponibles alors :**
 - Usines de moyenne ou de grande chute avec conduites forcées (Calypso)
 - Usines au fil de l'eau (Kembs, Chèvres)



Les centrales de haute chute (> 200 m)

- Associées à des réservoirs et alimentées par des conduites forcées
- Exemple: L'usine souterraine de Churchill Falls au Canada (Labrador)
 - Deuxième plus puissante usine souterraine du monde
 - Puissance installée : 5 429 MW
 - Dimensions : 25 m x 295 m x 47 m
 - La prise d'eau est aménagée sur un réservoir de 6 988 km²
 - Hauteur brute de la chute : 312 m
 - Débit équipé : 1 840 m³/s
 - 11 turbines Francis alimentées par 11 conduites forcées



Les centrales de moyenne chute (40 m – 200 m)

Installées sur le cours moyen des fleuves et associées à des réservoirs



Les Trois Gorges sur le Yangtzi Jiang

- 18 200 MW : 26 turbines Francis x 700 MW
- Hauteur du barrage : 175 m
- Hauteur de chute : 120 m

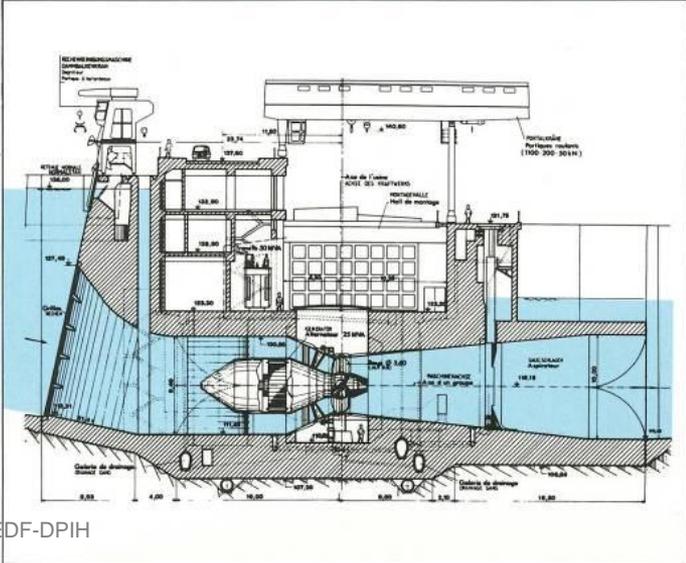


Itaipu sur le Parana

- 14 000 MW : 20 turbines Francis x 700 MW
- Hauteur du barrage : 196 m
- Hauteur de chute : 113 m

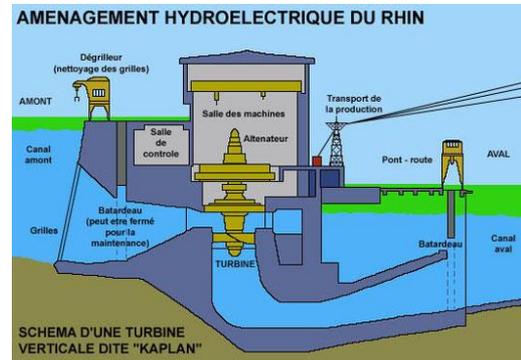
Les centrales de basse chute (< 40 m)

Dites « au fil de l'eau » (sans réservoir)
et installées en chaîne sur les cours d'eau



document EDF-DPIH

Aménagement de basse chute au fil de l'eau : Coupe au travers du barrage-usine de Gamsheim, qui fait partie de la chaîne d'ouvrages du Rhin (turbine axiale « bulbe » adaptée aux très basses chutes)



Les aménagements hydrauliques complexes

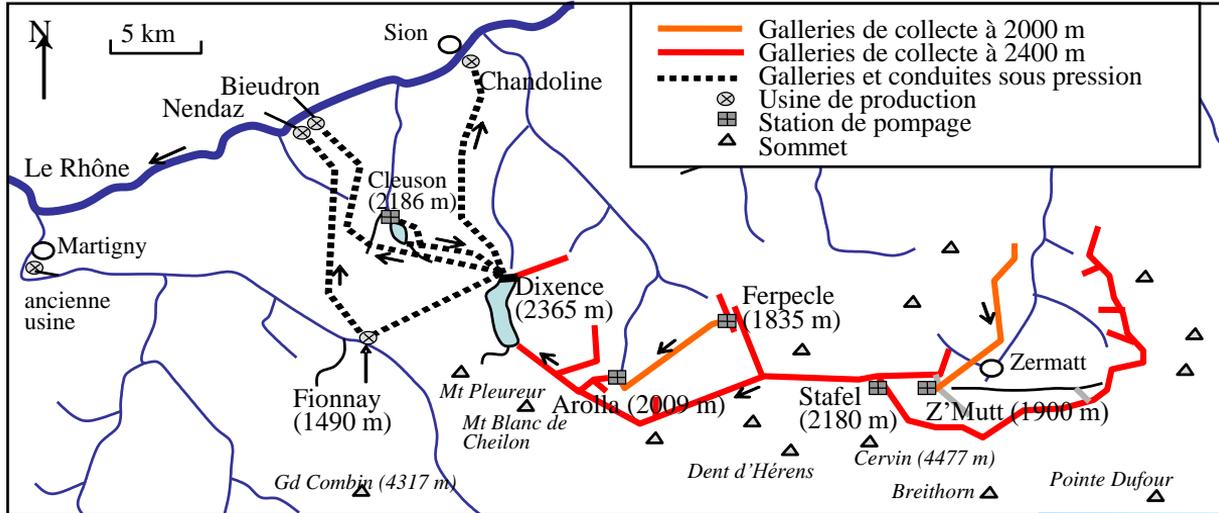
La Grande Dixence (Switzerland)

La plus haute chute du monde
(1 885 m)

La roue Pelton la plus
puissante du monde (400 MW)

En 2000, rupture de la galerie
blindée Dixence-Bieudron.

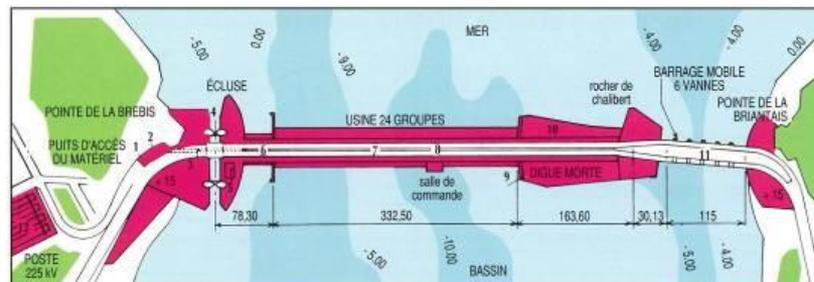
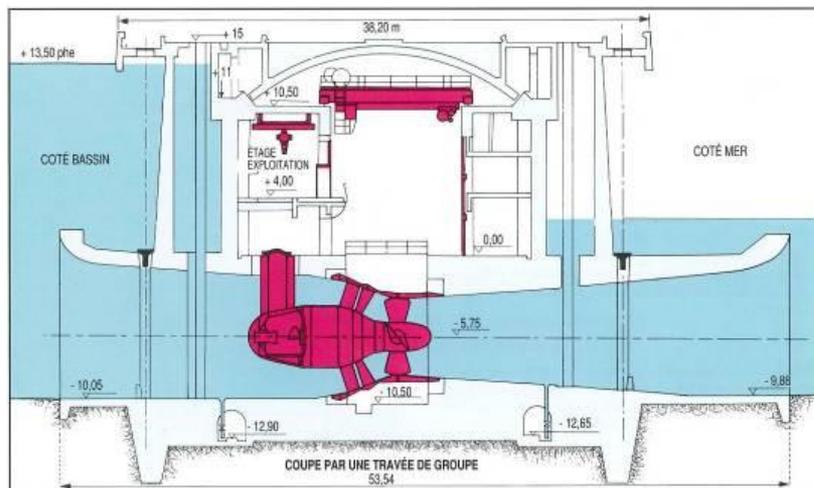
Remise en service en 2010



PL Viollet. *Histoire de l'Energie Hydraulique*. Presses des Ponts et Chaussées, 2005.



Les centrales marémotrices



document EDF-DPIH

- | | |
|--|--|
| 1 Bâtiment d'accès des grosses pièces, sol à la cote + 16,65 (C.M.) | 7 24 travées de groupe, distantes de 13,30 m |
| 2 Puits pour descente des pièces à la cote - 7,00, diamètre 12 m | 8 Travée de commande |
| 3 Galerie d'accès à - 7,00, passant sous l'écluse, longueur 80 m environ | 9 Mur d'extrémité de l'usine, constituant le soutènement de la digue morte |
| 4 Écluse de navigation, sas : 65 x 13 m, radier à + 2,00. | 10 Digue en enrochements |
| 5 Bâtiment administratif et accès principal à l'usine | 11 Six pertuis munis de vannes de 15 x 10 m |
| 6 Travées de démontage du matériel et ateliers d'entretien. | 12 Poste de départ. 3 lignes 225 000 V |

La Rance: 240 MW
(24 turbines bulbes de 10 MW),
500 GWh/an

Réalisation récente :
Usine de Shiwa en Corée
(2011): 254 MW (10 turbines
bulbes de 25,4 MW)

Projets :

- Canada (Fundy bay)
- Corée
- Royaume-Uni (barrage de la Severn)
- Russie

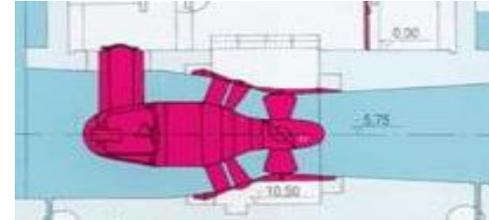
Les turbines hydrauliques

Les turbines hydrauliques

- **La turbine Kaplan (jusqu'à 30m)** : Cette turbine, inventée par l'ingénieur autrichien Viktor Kaplan (1876-1934), ressemble à une turbine à hélice, mais ses pales sont orientables. Elles sont bien adaptées à certaines usines au fil de l'eau situées sur des cours d'eau dont le débit varie énormément, parce qu'il est possible de régler l'orientation des pales en fonction du débit.
- **Le groupe bulbe (de 2 à 15m)** : constitué essentiellement d'une turbine axiale depuis l'entrée jusqu'à la sortie entraînant directement un alternateur fonctionnant à l'intérieur d'un carter étanche profilé en forme de bulbe. L'ensemble est immergé dans une galerie. Cette disposition est particulièrement bien adaptée aux très basses chutes (2 à 15 m)
- **La turbine Francis (de 10 à 300m)** : L'eau arrive sur le pourtour de la roue, pousse les aubes, puis se dirige vers l'axe de la turbine. Elle s'écoule ensuite par un canal de fuite situé sous celle-ci. Elle tient son nom de James Bicheno Francis (1815-1892), l'ingénieur américain qui l'a inventée en 1849.
- **La turbine Pelton (plus de 300m)** : Cette roue hydraulique, qui porte le nom de son inventeur, l'Américain Lester Pelton (1829-1908), récupère l'énergie cinétique contenue par des jets d'eau directement dirigés vers ses godets en forme de cuillère.



Turbine Kaplan



Groupe bulbe



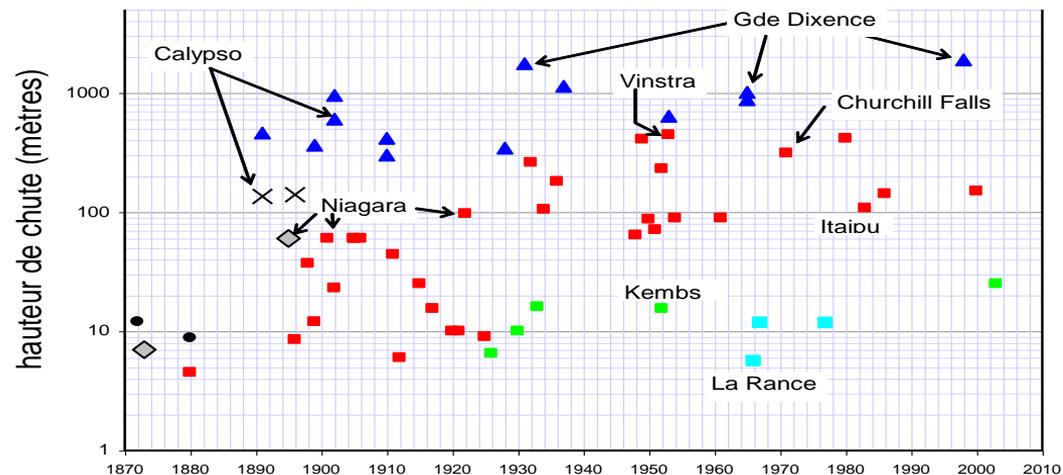
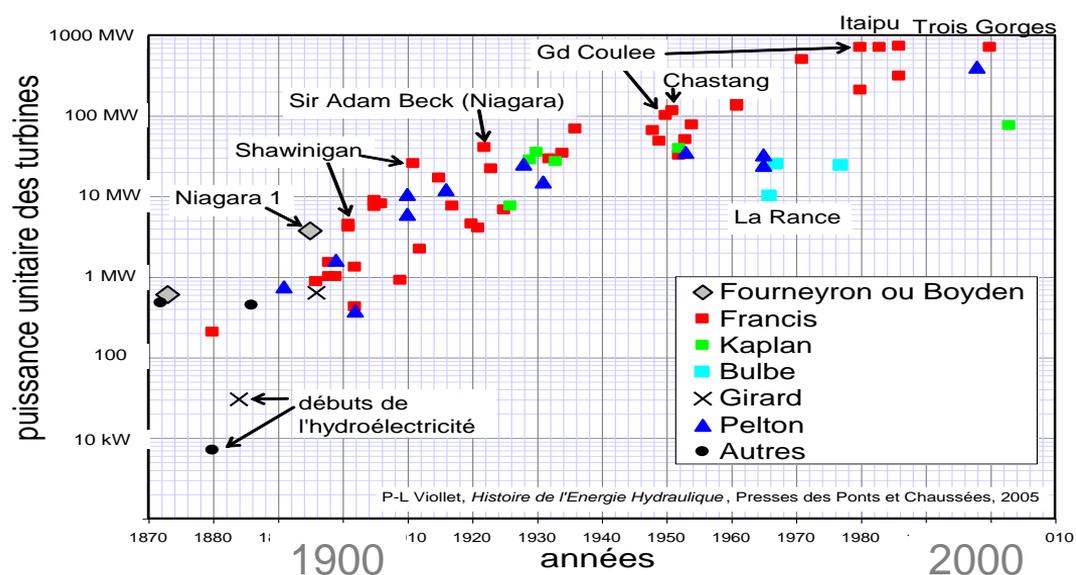
Turbine Francis



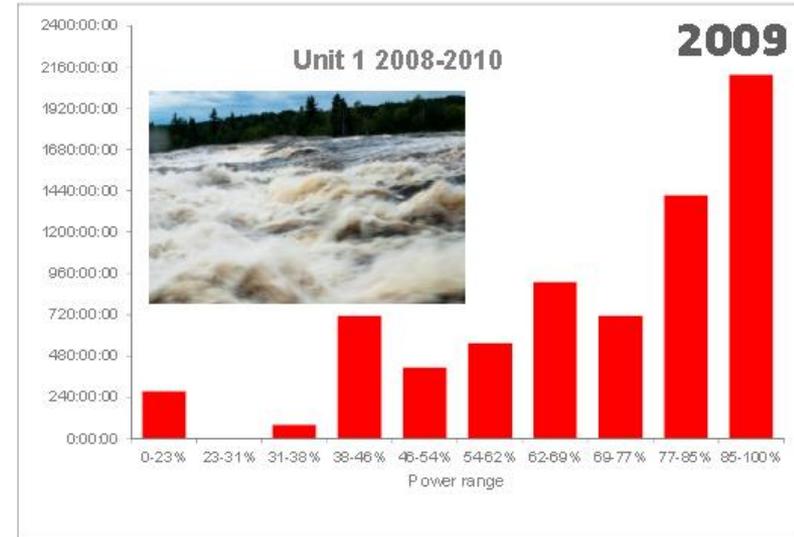
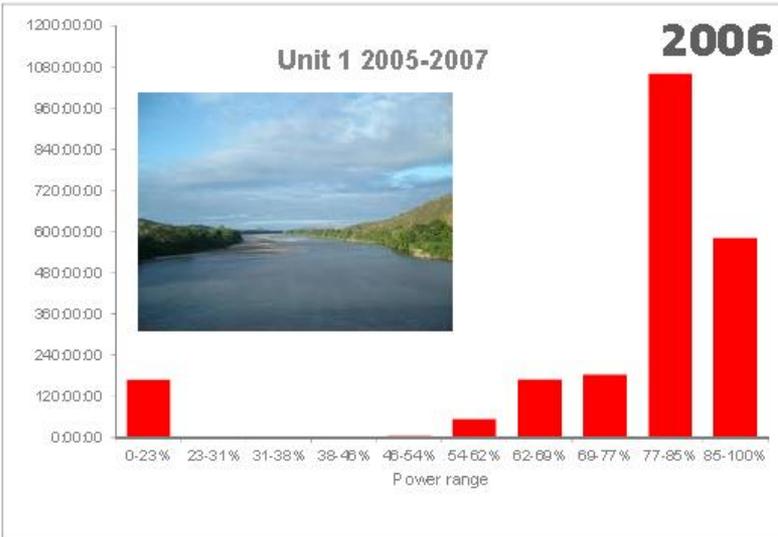
Turbine Pelton

Evolution de la performance des turbines

NB : Turbine Pelton la plus puissante de France :
Usine de la Coche : 240 MW



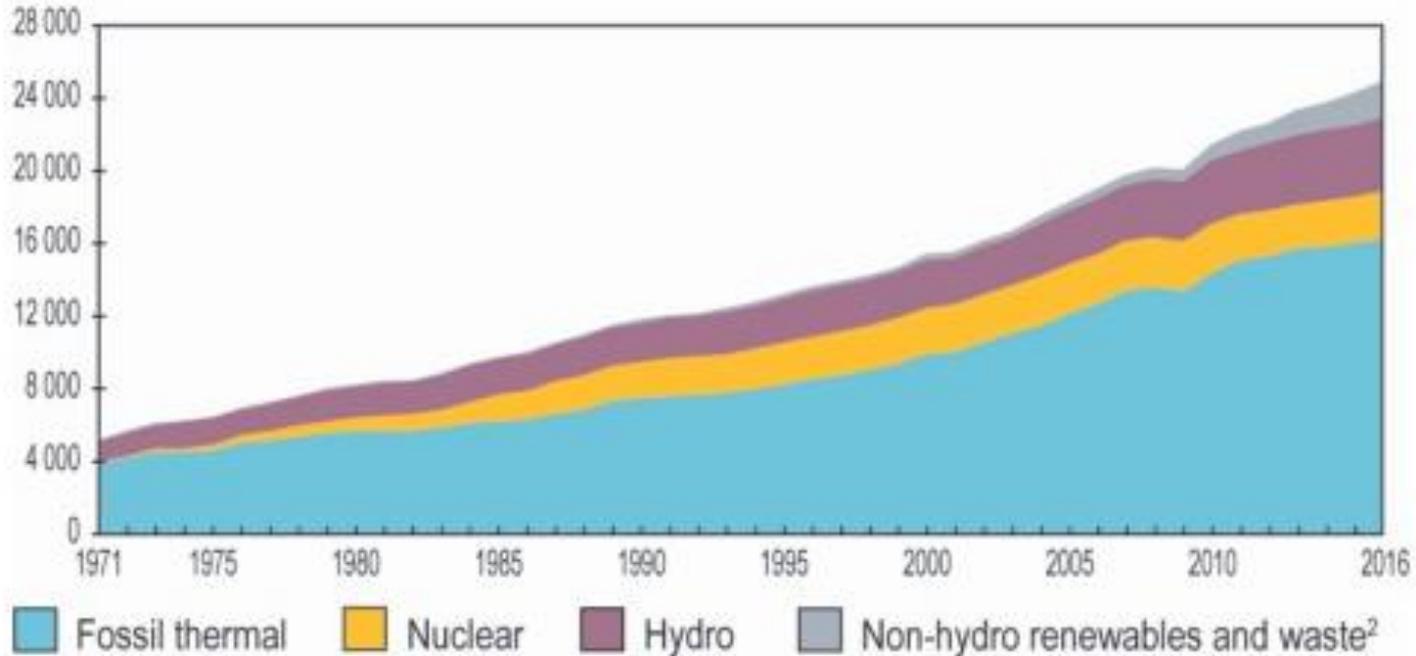
Exemple de fonctionnement hors zone de conception



L'hydroélectricité dans le mix électrique mondial

L'hydraulique dans le mix électrique mondial

World electricity generation¹ from 1971 to 2016 by fuel (TWh)



24 973 TWh produits en 2016 : 16,3 % hydraulique
(source : International Energy Agency)

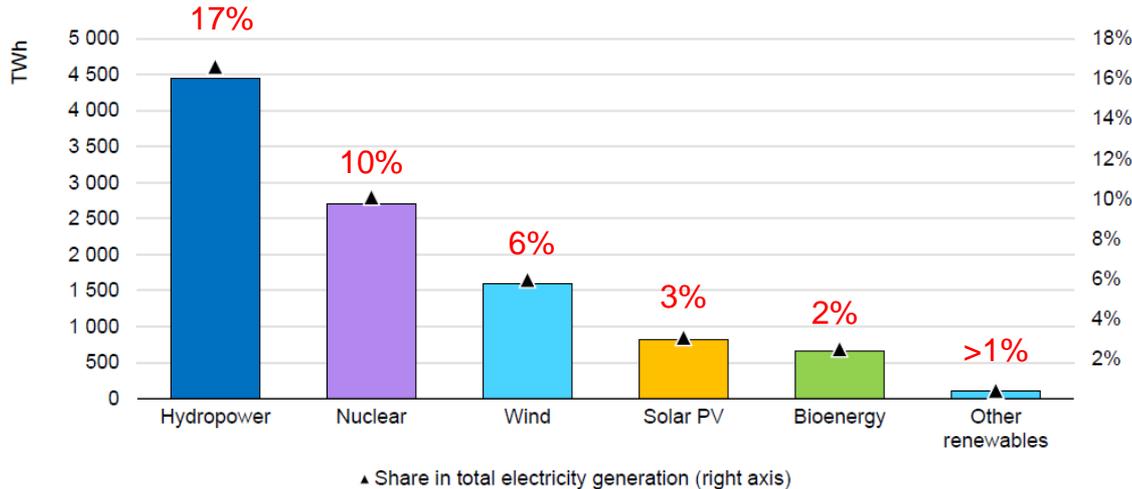
▪ **Hydropower = 17% of total world electric power generation**

✓ 1 330 GW of installed capacity worldwide ; 4300 TWh / year (2020)

▪ **Hydropower = largest source of low-carbon electric power generation technology**

Low-carbon generation technologies ≈ 40%

Fossil fuels generation ≈ 60%



- Coal : 36%
- Gas : 24%
- Oil : 3%

Sources :

- IEA (2021) : Hydropower Special Market Report
- IHA (2020) : Hydropower status report

Le parc hydraulique mondial

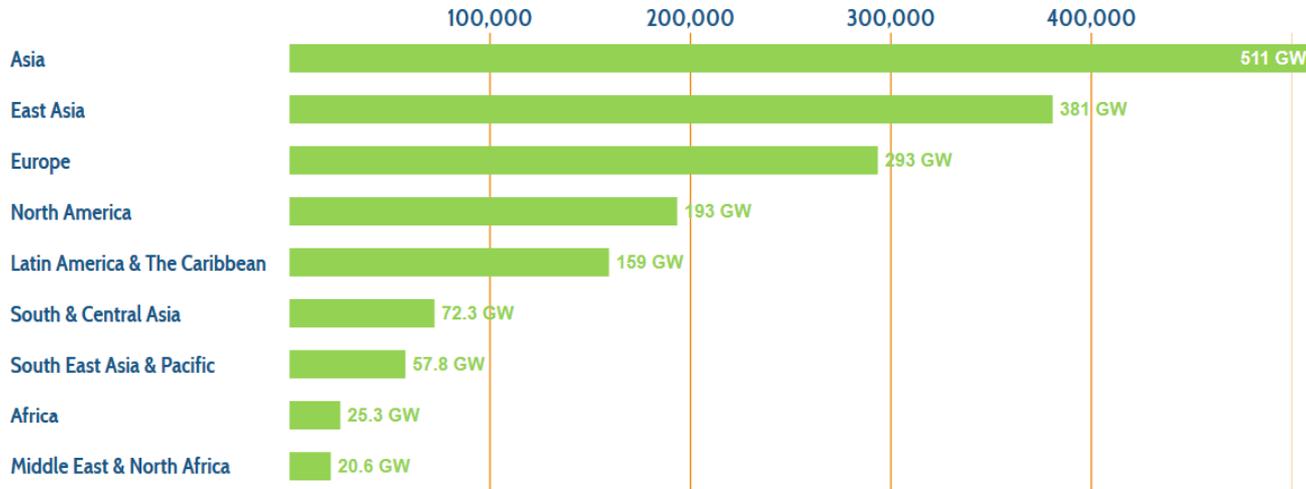
GLOBAL HYDROPOWER INSTALLED CAPACITY

HYDROPOWER
INSTALLED
CAPACITY

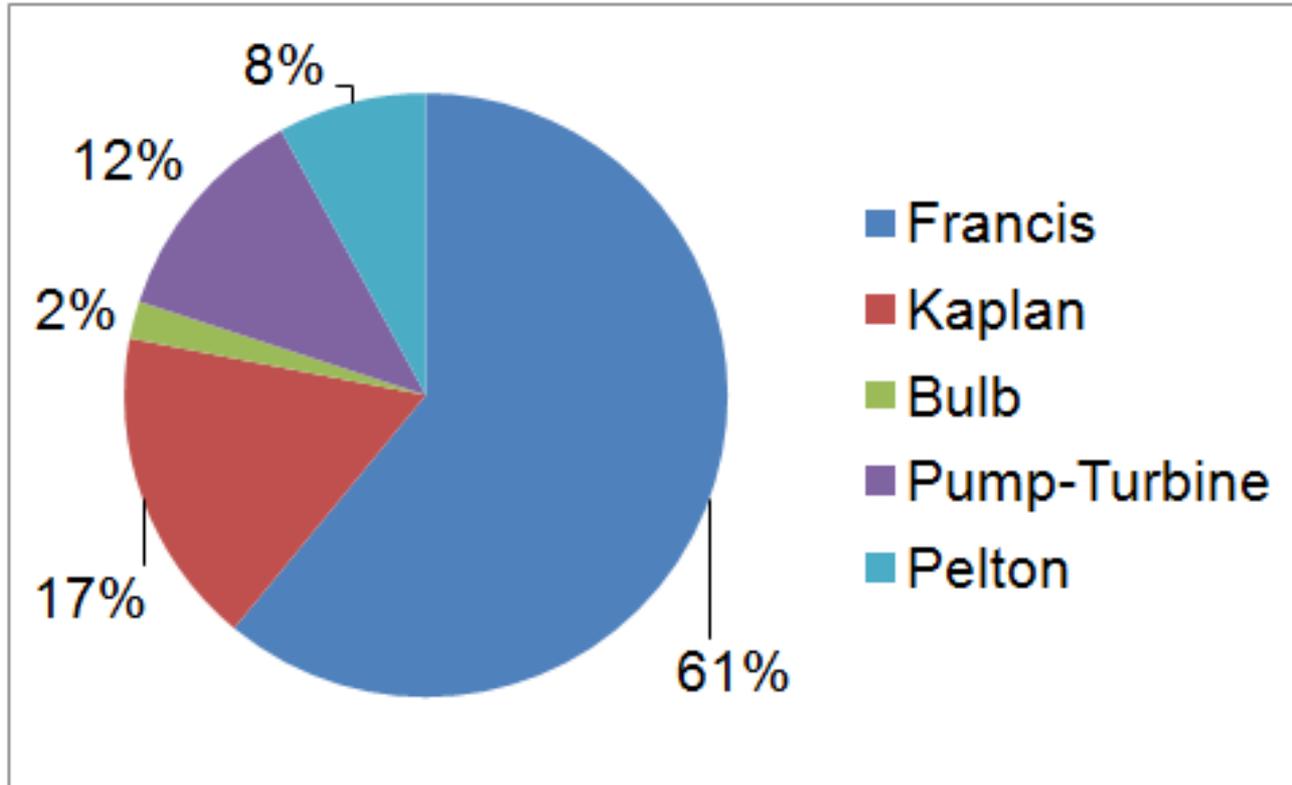
1.21
TW

+ 24 GW/an (source AIE) => **2 000 GW attendus en 2050 (x2)**
1 000 GW à construire + 1 000 GW installés à moderniser

HYDROPOWER INSTALLED CAPACITY BY REGION



Répartition par type de turbines



Répartition par types de turbines hydrauliques du parc mondial

Les plus grandes usines hydroélectriques équipées de groupes Francis dans le monde

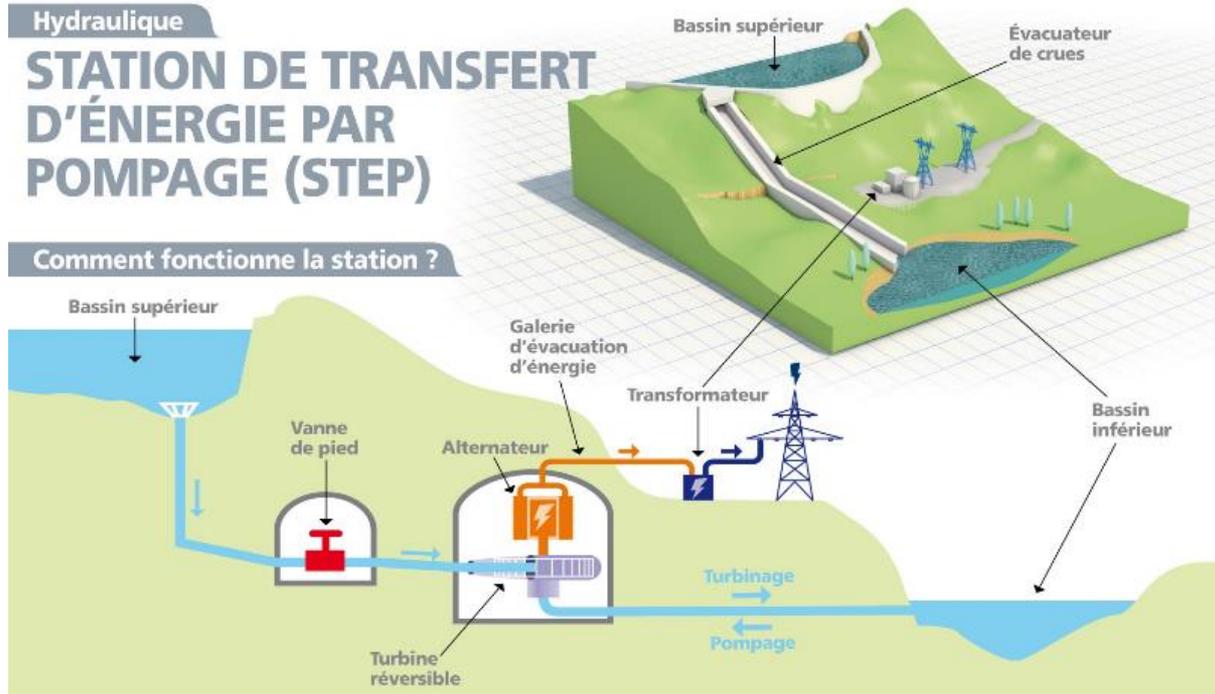
| Usine hydroélectrique | Pays | Capacité |
|-----------------------|-------------------|-----------|
| 3 Gorges | Chine (2009) | 18 200 MW |
| Itaipú | Brésil / Paraguay | 14 000 MW |
| Belo Monte(*) | Brésil | 11 233 MW |
| Guri (Raúl Leoni) | Vénézuela | 10 000 MW |
| Grand Coulée | USA | 6 494 MW |
| Sayano – Shushensk | Russie | 6 400 MW |
| Krasnoyarsk | Russie | 6 000 MW |
| Churchill Falls | Canada | 5 428 MW |
| La Grande 2 | Canada | 5 328 MW |
| Bratsk | Russie | 4 500 MW |
| Ust-Ilim | Russie | 4 320 MW |
| Tucuruí | Brésil | 4 245 MW |

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Principe des STEPs

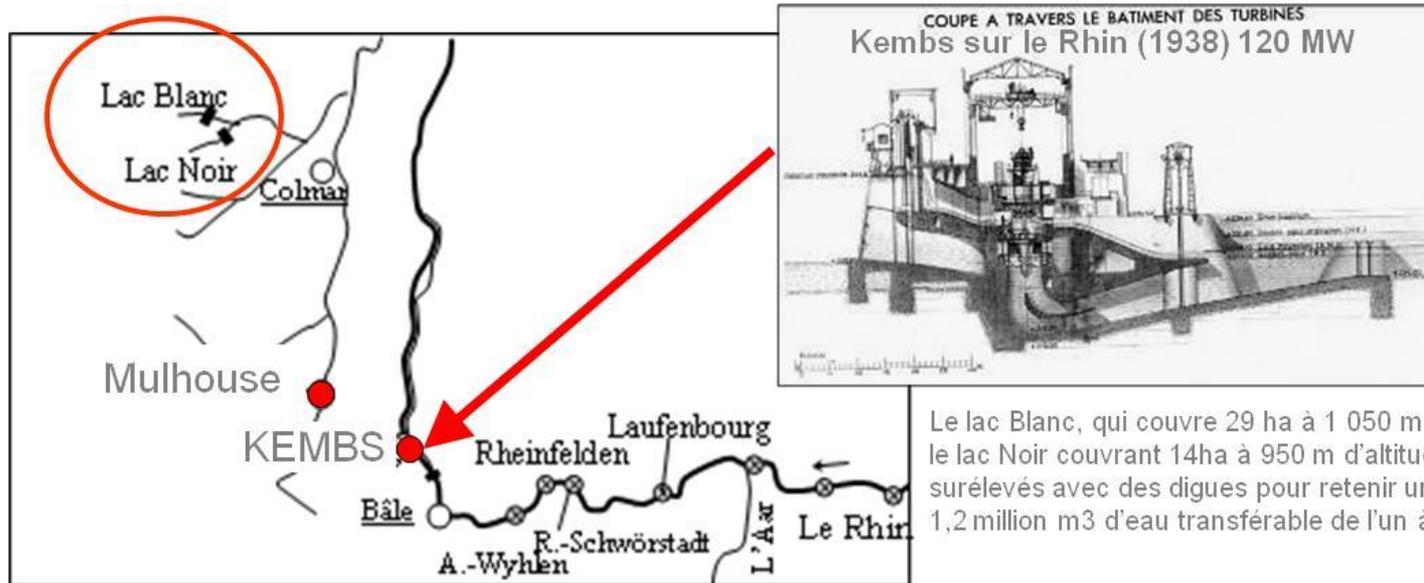
Les STEP permettent le stockage de l'électricité en remontant l'eau vers un bassin supérieur afin de la turbiner ultérieurement pour restituer l'énergie au réseau.

Elles permettent ainsi d'éviter d'écrêter les EnRV en absorbant par pompage le surplus de production



Les STEP : un développement ancien qui se renouvelle

- 1902 – Premières stations de pompage en Suisse et en Allemagne
- 1938 – L'usine de Kembs sur le Rhin (qui alimente la ville de Mulhouse) est complétée par la station de pompage du lac Blanc et du lac Noir
- 1970-1990 – Développement en Europe, au Japon, aux USA en plus de celui d'installations de grande taille
- Depuis 2000 – Une nouvelle vague de développement dans le monde en lien, en particulier, avec l'intégration des énergies renouvelables

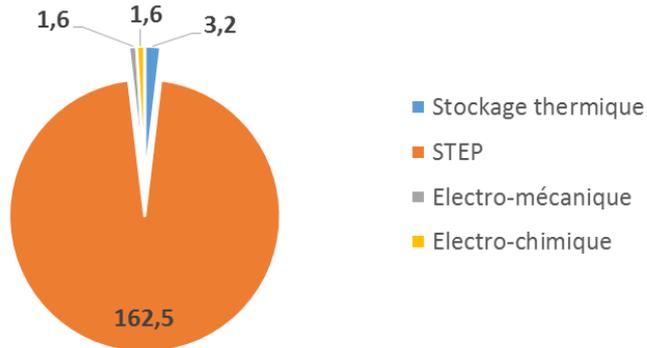


Le lac Blanc, qui couvre 29 ha à 1 050 m d'altitude, et le lac Noir couvrant 14ha à 950 m d'altitude, ont été surélevés avec des digues pour retenir un volume de 1,2 million m³ d'eau transférable de l'un à l'autre.

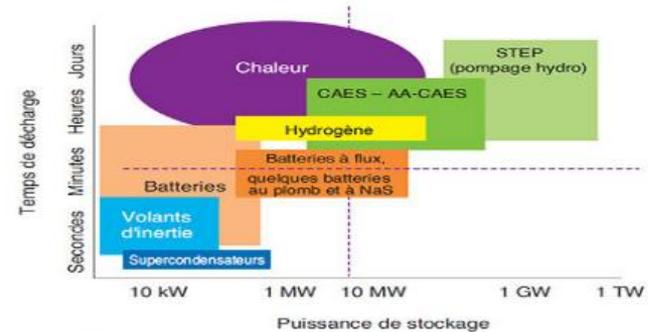
Les STEPs, premier moyen de stockage du système électrique !

- Un moyen fiable et efficace (75 à 80% de rendement global)
- En France : 6 STEPs : 5 GW en turbinage et 4,2 GW en pompage
- 5 GW
 - } 2,7 GW de STEPs hebdomadaires (temps de décharge > 30h)
 - } 2,3 GW de STEPs journalières (temps de décharge de quelques heures)

Puissance mondiale des différents types de stockage (GW)



Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie)



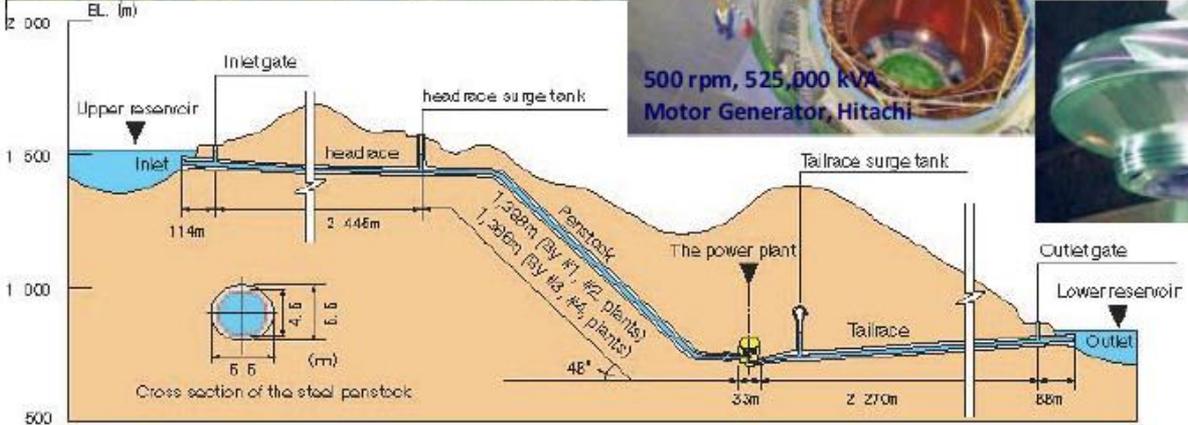
Source : IFPEN d'après diverses sources

Exemple : la STEP de Kannagawa Au Japon



**6 Pump-Turbines
@ 500 rpm**

**500 rpm, 525,000 kVA
Motor Generator, Hitachi**



- ✓ **2'820 MW Capacity**
- ✓ **6 Pump-Turbines, 470 MW Pumping Power, 625 mWC Head**
- ✓ **TEPCO, Tokyo Electric Power Co.**

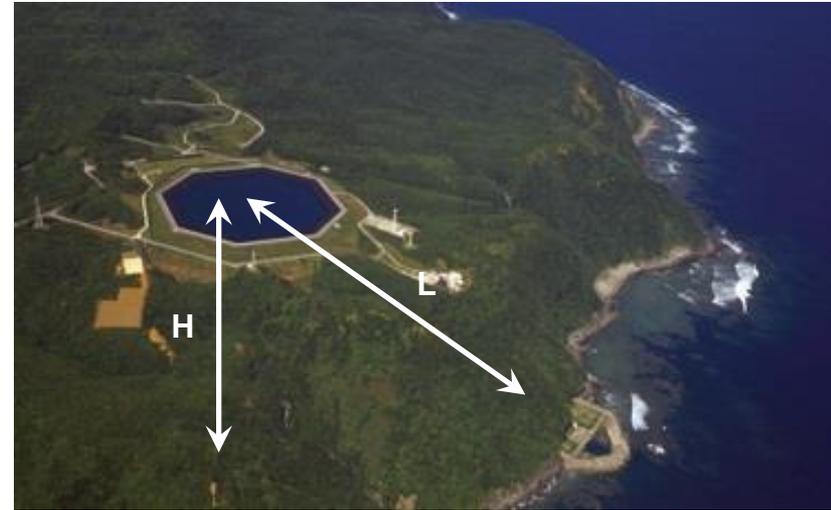
Exemple de STEP récente en Europe

- la STEP Limberg II en Autriche (VERBUND-Pöyry), mise en service en 2011, profite d'une différence de niveau de 365 m entre ses deux réservoirs (81 et 85 Mm³)
- L'usine souterraine mesure 62 x 25 x 24 m et abrite 2 turbines-pompes réversibles ayant chacune une puissance nominale de 240 MW
- Production par an : 1,3 TWh



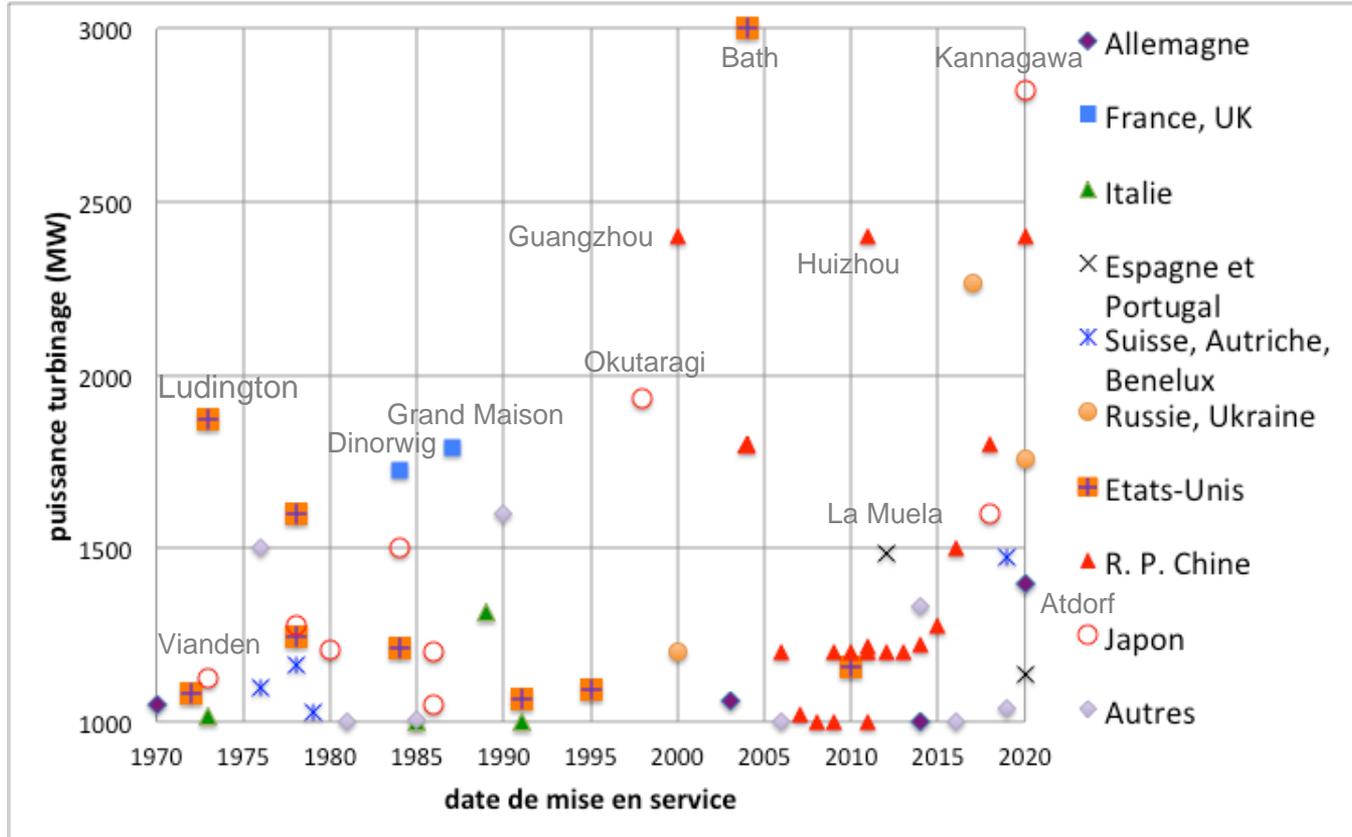
Exemple de STEP marine

- **1^{ère} réalisation : Okinawa (Japon)**
 - ✓ Réservoir octogonal de 250 m de diamètre
 - ✓ 30 MW, stockage 180MWh, 150m de chute à 600m de la côte, digues de 25m
 - ✓ Aujourd'hui démantelée pour des raisons économiques
- **Avantages:**
 - ✓ Le réservoir aval existe déjà
 - ✓ Ratio L/H favorable sur des sites montagneux ou avec des falaises de grande hauteur
- **Enjeux :**
 - ✓ Corrosion et environnement marin agressif
- **Opportunité : mutualiser avec une usine de dessalement**
 - ✓ Combinaison de la production d'énergie et de la production d'eau douce
 - ✓ Mutualisation des coûts et réduction des investissements
- **Il y a des projets en Outremer (EDF)**



Okinawa : First marine pumped-storage plant (Japan)

STEPS de plus de 1 000 MW dans le monde



En Europe, la plupart des 170 STEP ont une puissance de seulement quelques centaines de MW et n'apparaissent pas, en conséquence, sur ce graphique

Les STEPs en France

- ◆ 6 grandes STEP, appartenant toutes à EDF, 1976-1987
- ◆ Revin a fait l'objet d'une rénovation
- ◆ STEP : mission de « black start » pour les centrales nucléaires (ex.: Revin pour Cattenom, Chooz, etc.)
- ◆ STEP à cycle journalier : Revin, Super Bissorte, La Coche, Le Cheylas
- ◆ STEP à cycle hebdomadaire : Montézic, Grand Maison
- ◆ Des STEP en projet
 - ◆ Remise en exploitation de la STEP de lac Blanc/lac Noir
 - ◆ STEP de Rodonat envisagée
 - ◆ STEP marine en Guadeloupe (50 MW)

Localisation des STEPs en France



Les STEPs en France

| | Montézic 1982 | Revin 1976 | Grand Maison 1985(*) | Super Bissorte 1987 | La Coche 1977(**) | Le Cheylas 1979 | Total |
|-------------------------------|------------------|---------------|----------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------|--------------|
| Capacité en turbinage (MW) | 910 | 720 | 1 790 | 730 | 380 | 460 | 4 980 |
| Capacité en pompage (MW) | 870 | 720 | 1 160 | 630 | 310 | 480 | 4 170 |
| Nombre de pompes | 4 | 4 | 8 | 4 | 2 | 2 | |
| Constante de temps (h) | 40 | 5 | 30 | 5 | 3 | 6 | |

En moyenne annuelle, la production obtenue par les STEP est de 3 600 GWh

(**) La STEP de Grand'Maison permet de mobiliser sur le réseau une puissance de 1800 MW en 3 minutes, soit la puissance de 2 réacteurs nucléaires

(*) Mise en service en 2019 d'une roue Pelton de 240 MW (+20% en turbinage) - NB : c'est la roue Pelton la plus puissante de France

L'évolution du modèle d'activité

- **Développement entre 1970 et 1990** (plus tard en Chine) : les STEP viennent compléter les grandes centrales (nucléaires et charbon)
- **Nouvelles phases de développement depuis 2000** : le modèle d'activité s'ouvre à cause du besoin croissant de **flexibilité** dans la gestion des systèmes électriques.
- **Diversité des services rendus** :
 - Arbitrage sur les prix du marché
 - Fourniture de services de système (réglage tension-fréquence), mise en place de réserves
 - Secours en cas de problème réseau, **black start** (redémarrage des centrales nucléaires après un arrêt total du réseau)
 - Puissance garantie pendant les périodes de pointe
 - Aide à l'intégration des énergies renouvelables intermittentes

Exemple : La STEP de Dinorwig (UK) mise en service en 1984 pour compléter les centrales nucléaires britanniques, sert maintenant à fournir les services système au réseau national (elle est capable de passer de faible puissance à puissance maximale en 16 secondes)

Les services apportés par l'hydroélectricité au réseau électrique

L'équilibre offre - demande

5 types d'ouvrages :

Centrales au fil de l'eau

Base

- Peu de capacité de stockage. La puissance produite dépend directement du débit en rivière.

Centrales d'éclusee

Semi-Base

- Capacité de stockage plus élevée. Possibilité de moduler la puissance si besoin.

Centrales de lac

Pointe

- Forte capacité de stockage. Capacité à produire si besoin.

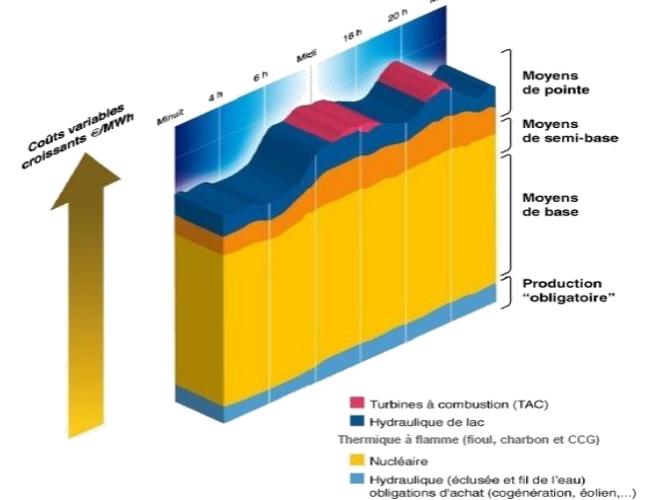
Station de Transfert d'Énergie par Pompage

STEP

- Eau turbinée d'un bassin amont vers un bassin aval en période de forte consommation.
- Eau pompée du bassin aval vers le bassin amont en période de faible consommation pour reconstituer le stock.

L'empilement des moyens de production

Exemple d'une journée de forte consommation en hiver



Marémotrice

- Modèle unique dans le monde. La centrale de la Rance utilise le mouvement de la marée pour créer le dénivelé nécessaire à la production d'électricité.

La contribution de l'hydraulique au réseau électrique

Flexibilité, optimisation globale de la production, services au système et services de secours

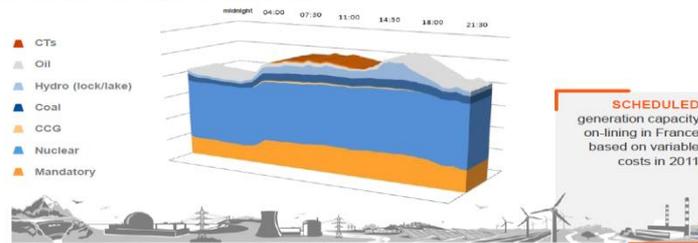
- **Les usines de basse chute** fournissent une énergie renouvelable peu modulable mais **régulière et prévisible**
- Les réservoirs des centrales de **haute et moyenne chutes** permettent :
 - d'**optimiser globalement** la production, à l'échelle de l'année
 - d'**ajuster rapidement la puissance** :
 - En tant que **réserve d'énergie**
 - **En secours rapide** en cas de problème réseau ou de « black start »

ex. black out de 2006 : en France

- **2 000 MW libérés en 11 min.**
- **5 000 MW libérés en 40 min.**



■ An example of a high-demand winter day



L'hydraulique dans la transition énergétique

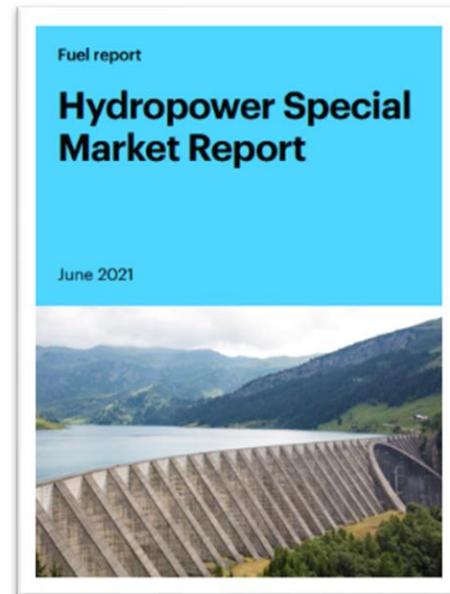
L'hydroélectricité au cœur de la stratégie bas carbone

« *Hydropower is the 'forgotten giant' of clean electricity, and it needs to be put squarely back on the energy and climate agenda* »

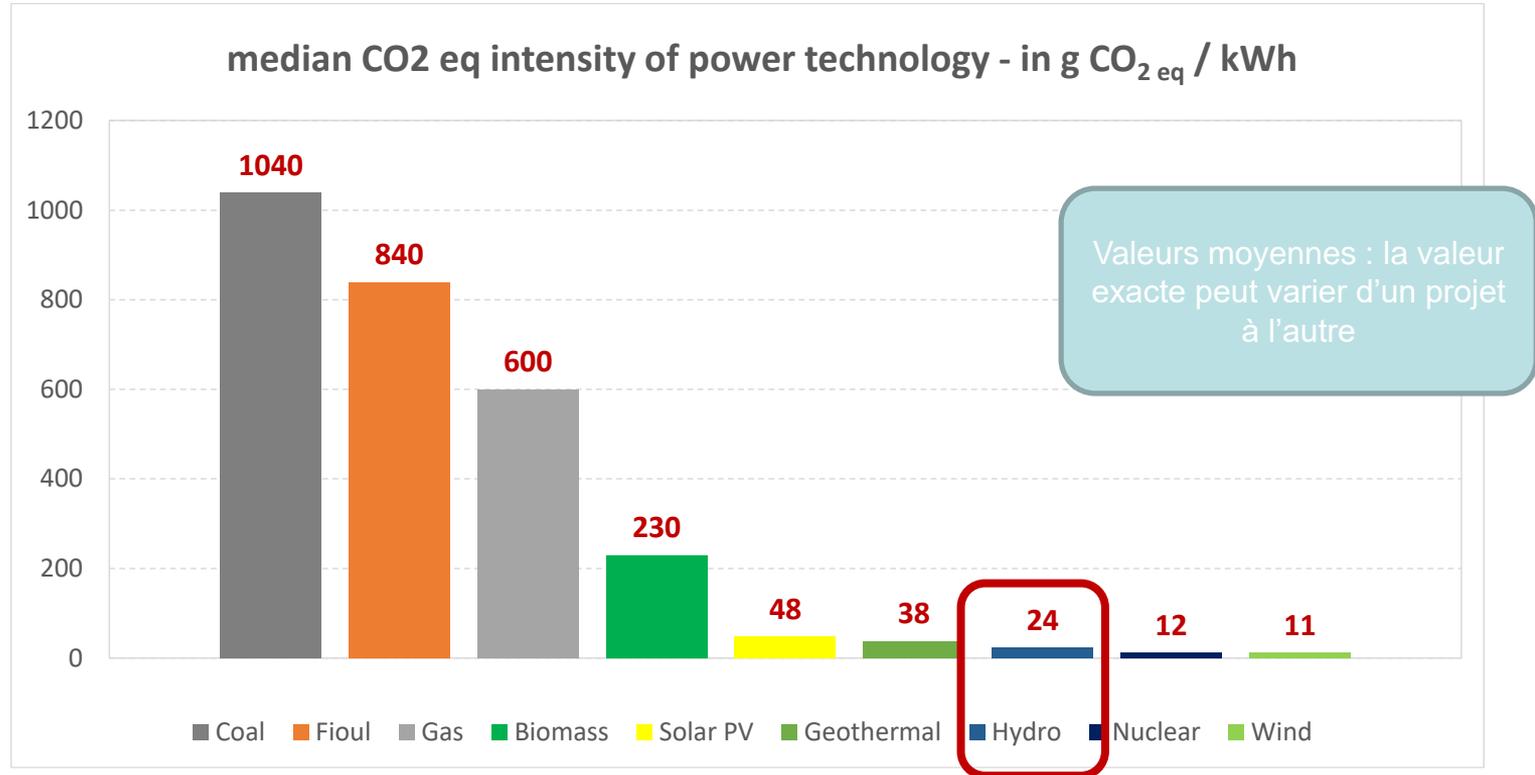
« *L'hydroélectricité est le "géant oublié" de l'électricité propre et doit être replacée au cœur de l'agenda énergétique et climatique.* »

(IEA Executive Director, June 2021)

International Energy Agency :
Hydropower Special Market Report (2021)



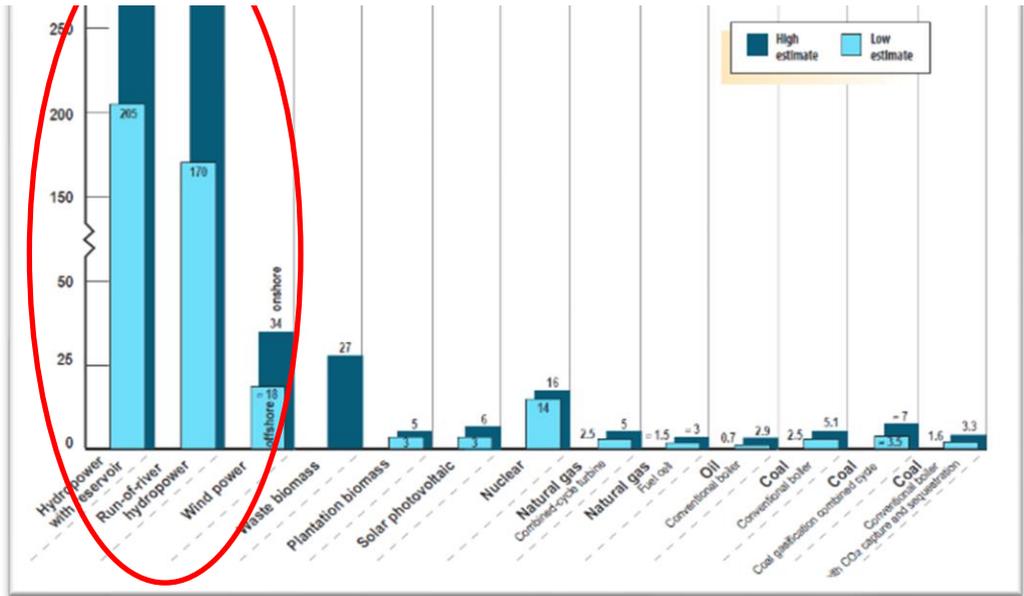
Une des plus faibles intensité carbone



Source : from IPCC / AR5 report (2014)

Un des meilleurs EROEI

E.R.O.E.I. = Energy Return On Energy Investment = $\frac{\text{Energy produced during normal system lifespan}}{\text{Energy needed to build, maintain, and fuel the system}}$



Sources : IEC – TC4 (2005) & Ruggieri (ICOLD, 2009)

Quels moyens de flexibilité pour compenser la variabilité de la production éolienne et photovoltaïque ?

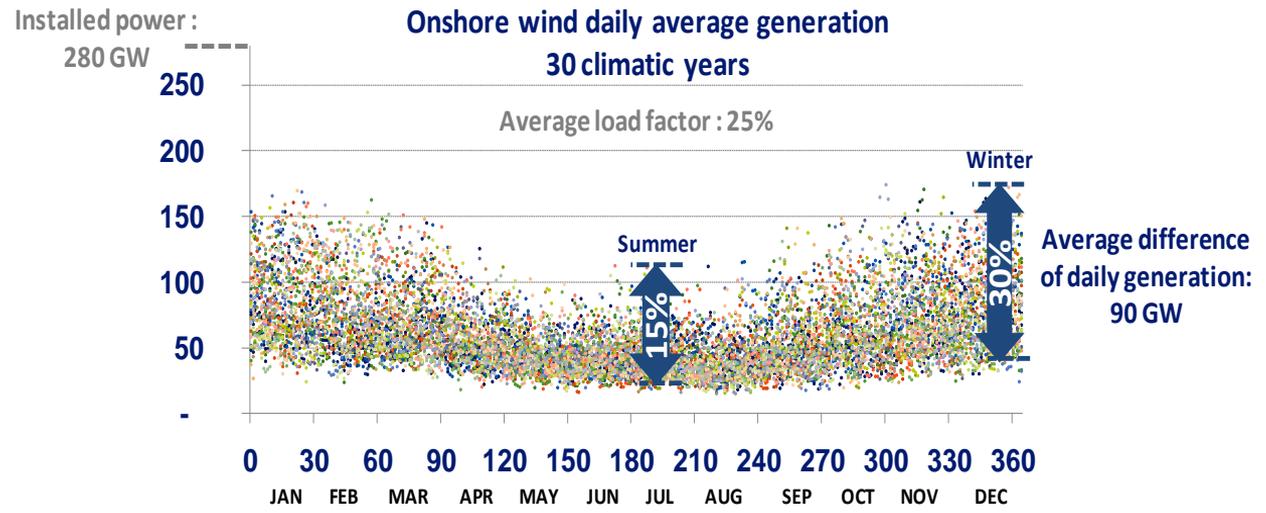
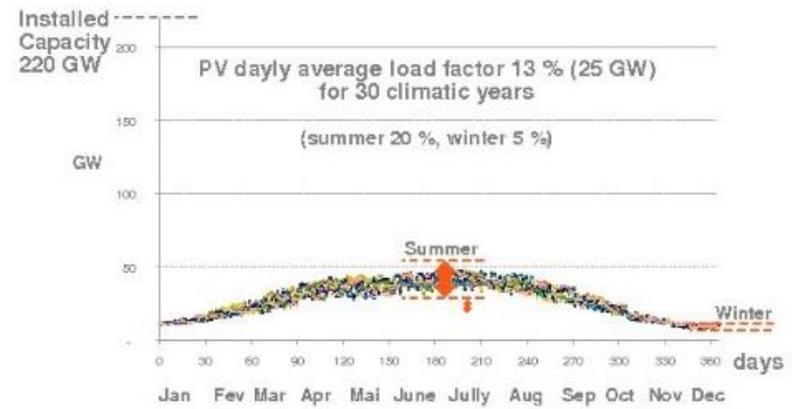
Trajectoire AIE *Net-Zero by 2050*

<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

- **Developpement important des énergies renouvelables variables (EnRV : éolien et solaire PV)**
 - ✓ **2020 existant** : EnRV = **9%** de la puissance mondiale installée
 - ✓ **2030 projection** : EnRV = **40%** (IEA 2021 projection)
 - ✓ **2050 projection** : EnRV = **65%** (IEA 2021 projection)
- **Croissance importante de l'électrification des usages :**
 - ✓ industrie, transports, production d'hydrogène, ...

⇒ **Consequence : besoin massif de flexibilité et de stockage**

Quelle variabilité pour la production éolienne et photovoltaïque ?



La flexibilité c'est quoi ?

Disposer d'une source d'énergie fiable (1) QUAND on le souhaite et (2) OÙ on le souhaite

Flexibilité temporelle

Solutions de stockage
dont Demand-Response



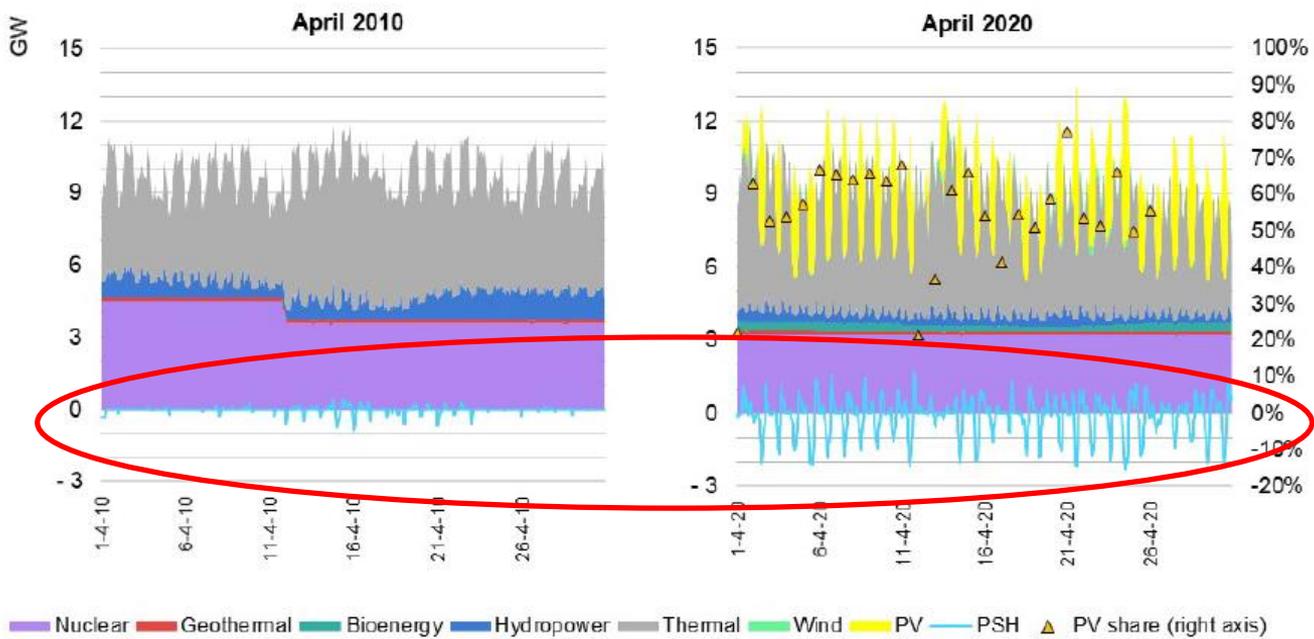
Flexibilité spatiale

Réseaux de transport
et de distribution



Besoin de flexibilité : exemple 1

- Ile de Kyushu (Japon) : évolution de la production et du pompage sur 10 ans



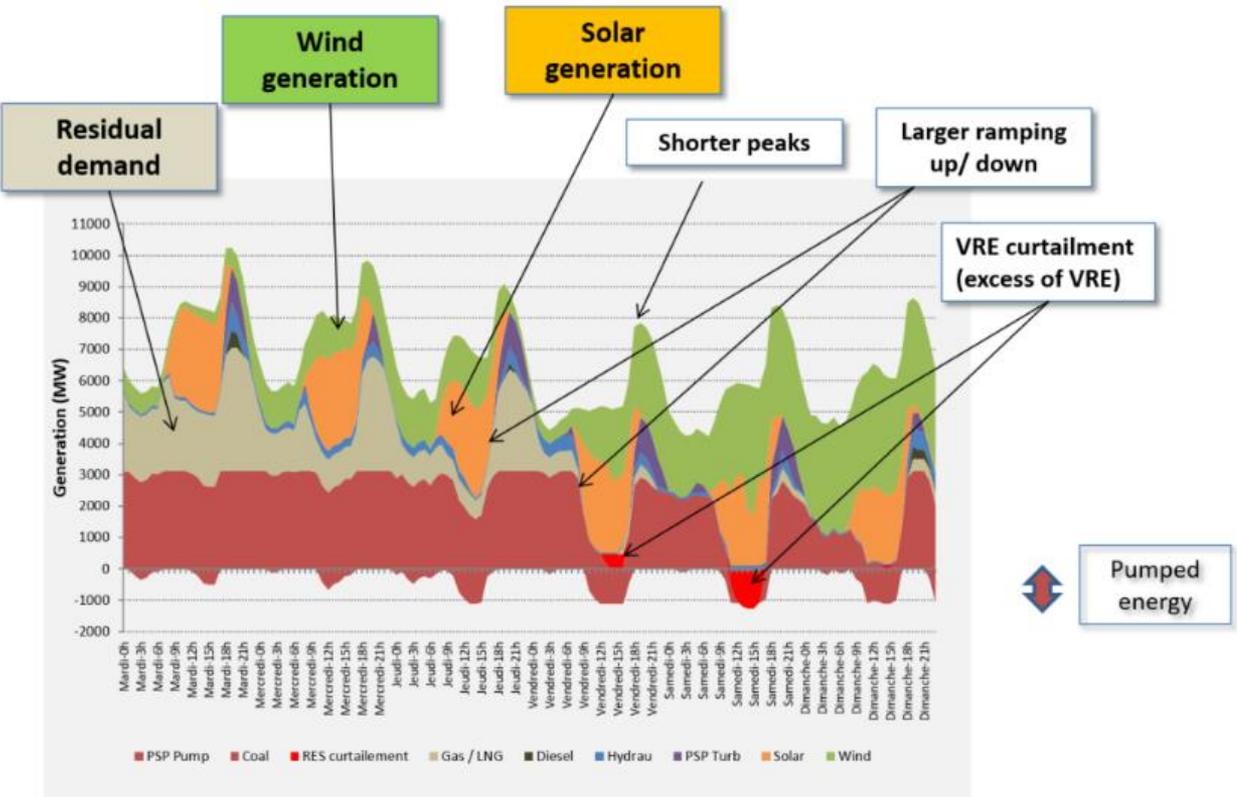
Evolution entre 2010 et 2020 :

- ✓ Solaire PV : **x 15** (de 0.6 to 10 GW)
- ✓ Volume des STEP : **x 10**

Source : from IEA (2021) : Hydropower Special Market Report

Besoin de flexibilité : exemple 2

▪ Maroc : impact de 32% d'EnRV sur une période représentative de 6 jours (projection 2030)



Besoins de flexibilité:

- ✓ Limiter les pics
- ✓ Limiter la pente des rampes (+/-)
- ✓ Eviter de trop écrêter la production EnRV

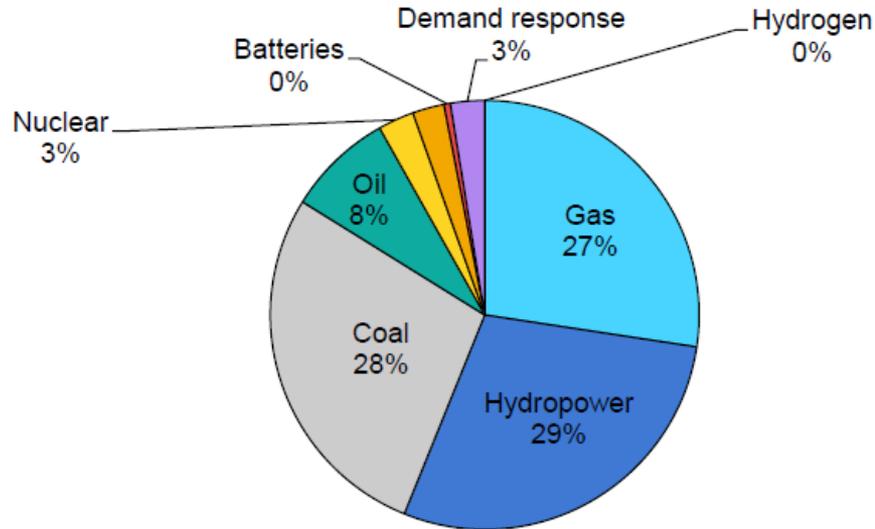
Solutions envisagées :

- ✓ Solaire à concentration
- ✓ Centrales combinées gaz
- ✓ **STEP**
- ✓ Batteries
- ✓ Demand-response

Source : ONEE & EDF (2016) : Master Plan for Morocco electric system

La flexibilité aujourd'hui

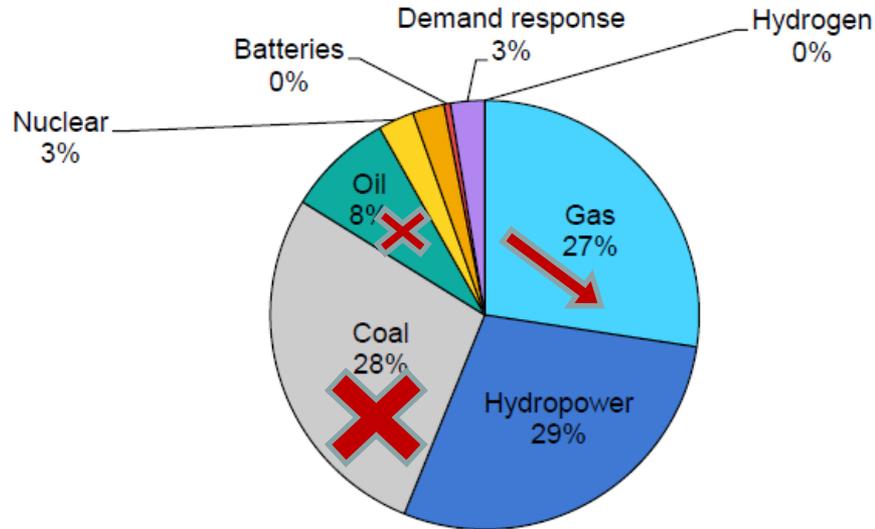
- **Hydroélectricité : premier moyen de flexibilité pour les besoins d'ajustement d'heure en heure, avec le charbon et le gaz (données 2020)**



Sources : IEA (2021) NetZero by 2050 roadmap report
and IHA (2021) – IFPSH, WG.3 report

La flexibilité demain ?

- Hydroélectricité : premier moyen de flexibilité pour les besoins d'ajustement d'heure en heure, avec le charbon et le gaz (données 2020)



Demain (2030 / 2050) :

- Besoins croissants
- Sans charbon ?
- Sans fioul ?
- Avec moins de gaz ?

⇒ **Opportunité de développement du stockage hydraulique au côté d'autres solutions**

Sources : IEA (2021) NetZero by 2050 roadmap report and IHA (2021) – IFPSH, WG.3 report

Perspectives de développement des STEP

- **Capacité installé aujourd'hui : 160 GW => 8 TWh d'énergie stockée par cycle (données 2020)**
 - ✓ 2030 : +10% ? 2050 : +50% ou plus ?
- **En France : entre + 1,5 GW (STEP) selon PPE (2030-2035) + 3GW (STEP) selon RTE (2050) qqs le mix**
- **IFPSH'2021 : International Forum on Pumped-Storage Hydro** – coordonné par L'IHA

Key recommendations for the Business Case of PSH projects

WG.1 : Markets & Regulation

- Viable remuneration and economic model
- Licensing and permitting timeline to be reduced

WG.2 : Sustainability

- PSH = key sustainable storage technology
- Use existing assessment tools (Hydro Sust. Protocol)

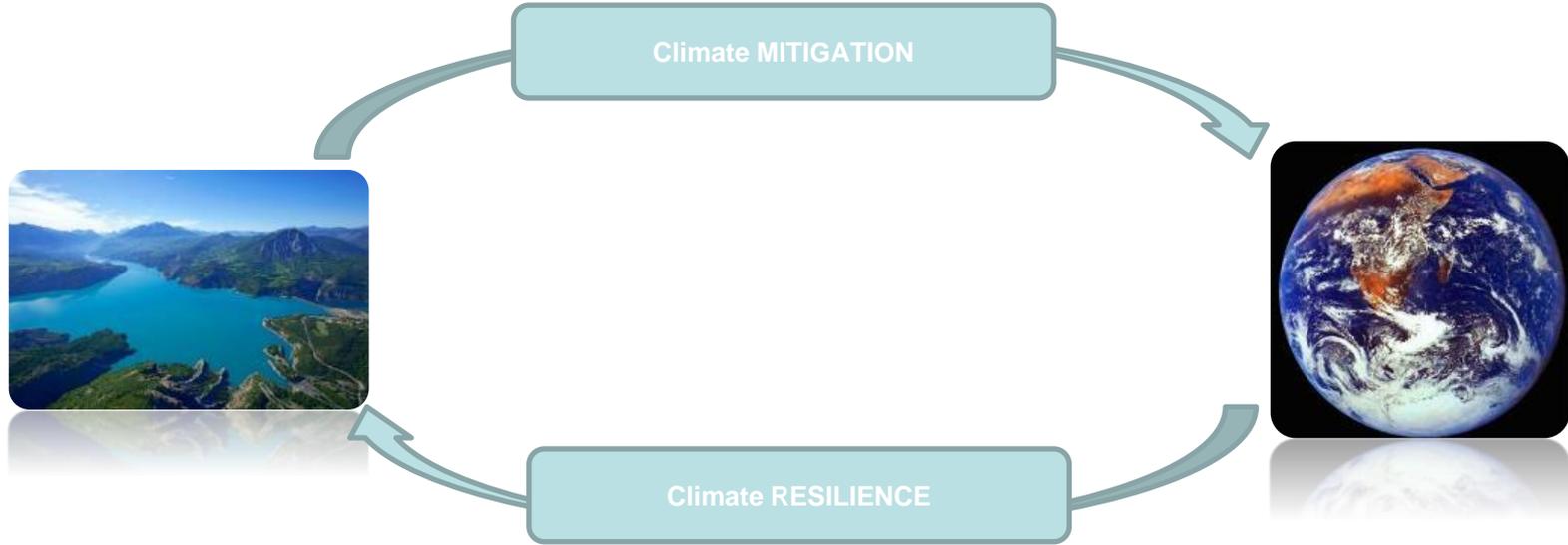
WG.3 : Costs, Technology, Innovation, Potential

- PSH : High flexibility performance
- Huge remaining potential

IFPSH reports and recommendations : <https://pumped-storage-forum.hydropower.org/>

Un défi pour l'hydroélectricité : la résilience au changement climatique

- L'hydroélectricité est un atout pour atténuer le changement climatique



- En retour : le changement climatique peut impacter l'hydroélectricité de façon directe ou indirecte

La projection climatique de la ressource en eau en France

Une Evapotranspiration inévitablement en hausse

- Due à une augmentation nette des températures de l'air

Des signaux contradictoires sur l'évolution des précipitations moyennes

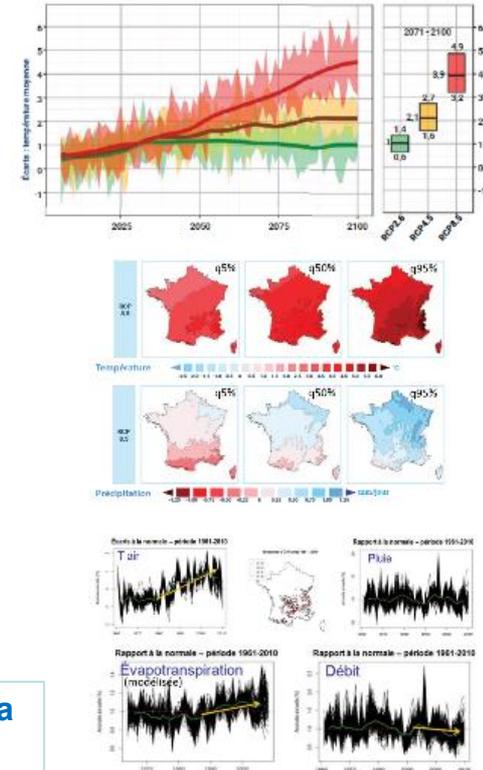
- Grande incertitude entre les modèles y compris sur le signe de la variation

Les évolutions seront contrastées en fonction des saisons (hiver-été) et de la localisation géographique (nord sud)

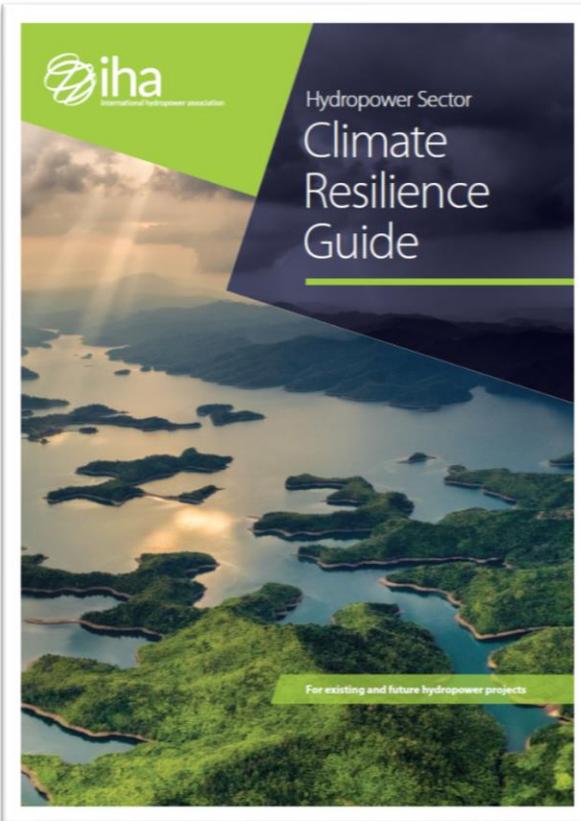
Une raréfaction de la ressource déjà observée

- Baisse de 14% de la ressource en eau en France métropolitaine (1990-2018)
- Le constat d'EDF sur son parc de production (1962-2010) : - 5% d'apport pour 1° C de réchauffement de l'air

Malgré une incertitude sur l'évolution future des précipitations moyennes la ressource va diminuer sous l'effet de l'augmentation des températures et de l'évapotranspiration. Les contrastes saisonniers vont s'amplifier

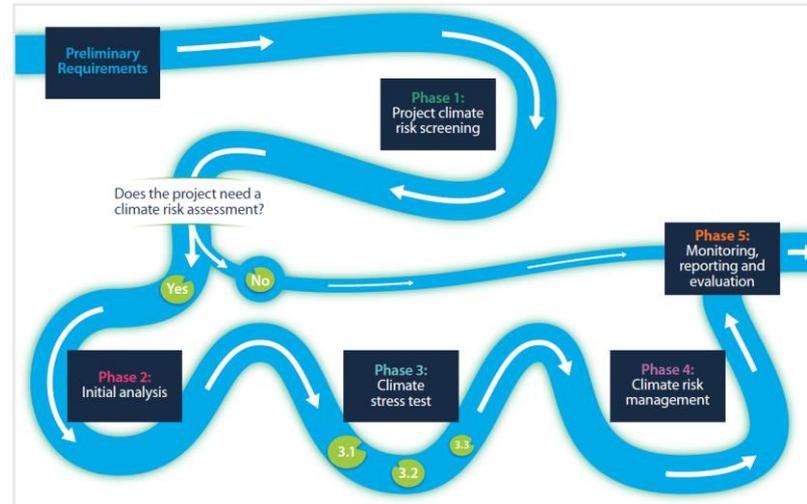


Résilience climatique de l'hydroélectricité



■ Cadre pour évaluer la résilience climatique en 5 étapes

Figure 1. The process of the Hydropower Sector Climate Resilience Guide.



Résilience des fonctions clés :

- Débits entrants et production
- Sécurité et impacts environnementaux
- Partage de l'eau entre les usages

<https://www.hydropower.org/publications/hydropower-sector-climate-resilience-guide>

Conclusions

- Le développement des énergies renouvelables variables (l'éolien et le solaire) entraîne un besoin croissant de flexibilité
- Les turbines hydraulique doivent s'adapter et gagner en flexibilité et en robustesse :
 - pour permettre un éventail de réglage de 0 à 100 %
 - pour résister à un nombre croissant de cycles démarrage/arrêt et un fonctionnement dans des zones de fatigue plus importante
- Dans un contexte de croissance des tensions sur l'eau, l'hydroélectricité permet de créer des stocks d'eau exploitables en fonction des priorités données aux différents usages par les Pouvoirs Publics
- Les STEPs sont la solution de stockage la meilleure marché et la plus appropriée pour arbitrer les variations de prix (creusées par le développement des EnRV) et ainsi, elles contribuent à l'intégration des énergies intermittentes
 - Les STEPs contribuent également aux services système sur différentes plages de temps (de la minute à la semaine) :
 - En fonction de la capacité des réservoirs et de leur localisation dans le réseau
 - Grâce au développement des turbines-pompes à vitesse variable

Merci de votre attention

- Bibliographie :

M Ginocchio, P.-L. Viollet, *L'énergie Hydraulique*, Lavoisier, 2012
(nouvelle édition mise à jour)

P.-L. Viollet, *Histoire de l'Energie Hydraulique*, Presses des Ponts et
Chaussées, 2007

P.-L. Viollet, *Stockage d'énergie par pompage hydraulique*, Techniques
de l'Ingénieur, 2013

- Revues :

International Journal on Hydropower and Dams

La Houille Blanche

- Sur le Web :

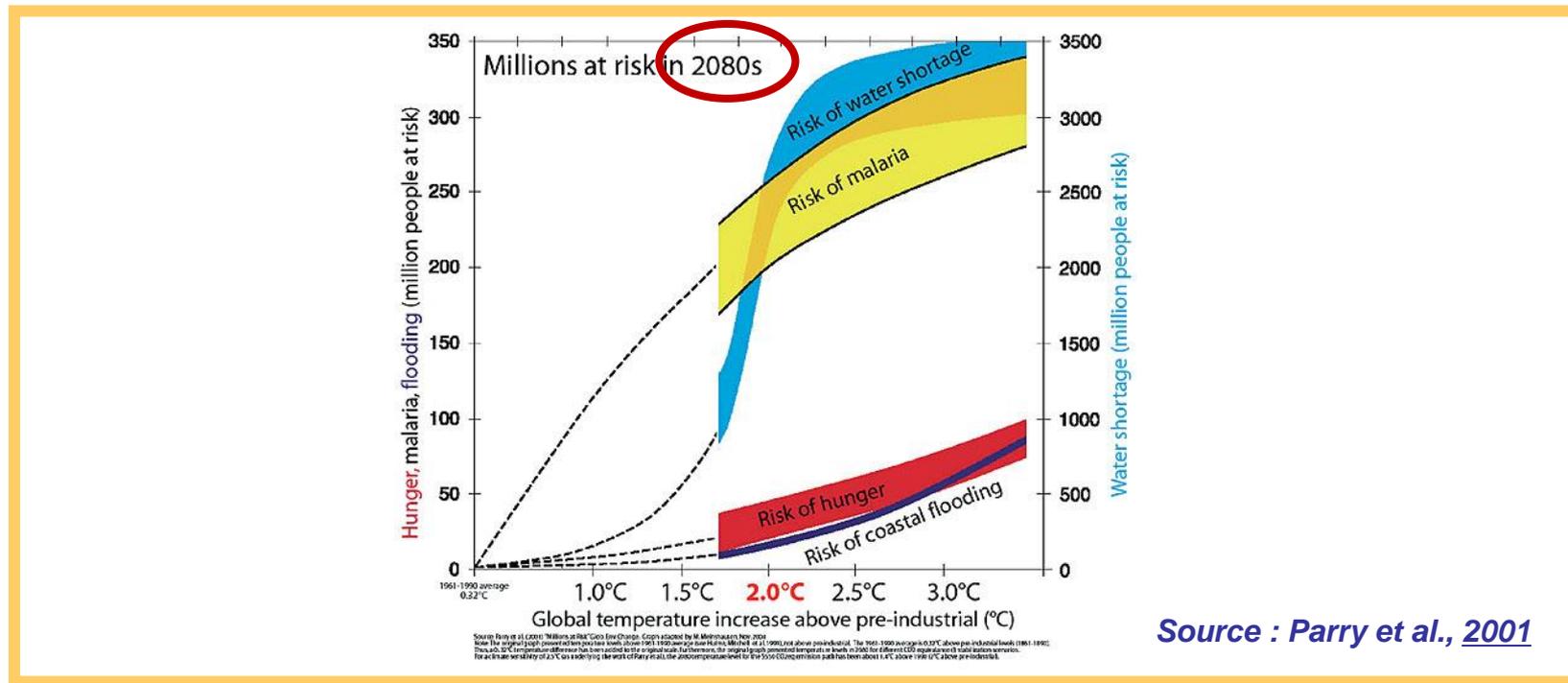
<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/production-de-l-electricite/les-differents-types-de-centrales-hydraulique>

L'accident de Sayano en Russie



Sayano facility after the accident

Des enjeux qui vont s'accroître du fait du changement climatique

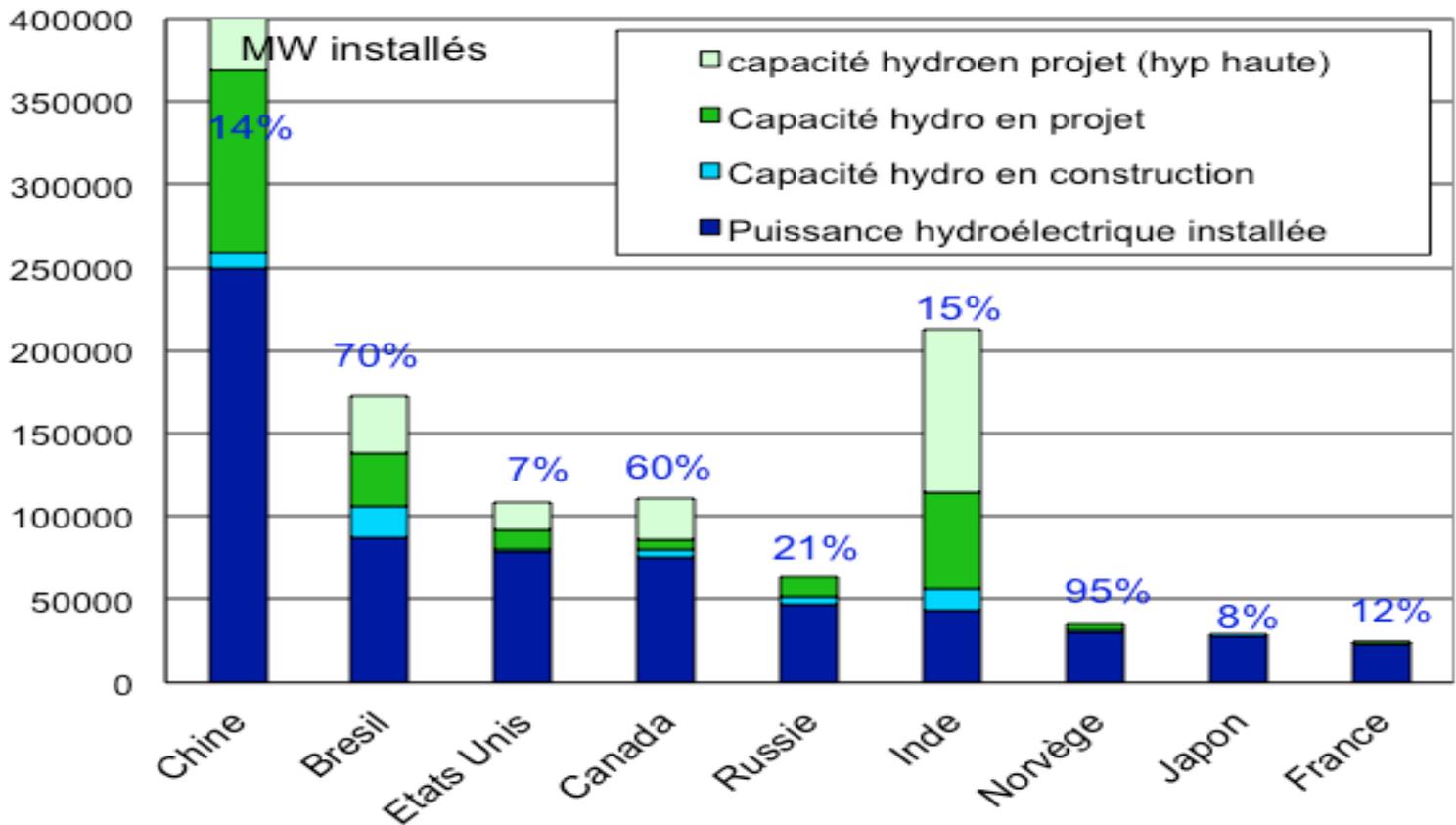


« La tension que fait peser le changement climatique sur la ressource en eau est le 1^{er} risque à terme »

Des technologies performantes et adaptables

- **Les stations de transfert d'énergie par pompage** ont un **rendement moyen** de l'ordre de **80%**
 - Situées entre deux lacs : technologie la plus courante
 - Technologie en développement : STEP marines, atolls artificiels...
- Les **technologies récentes de turbines-pompes à vitesse variable** sont capables de fournir les services système en pompage ou en turbinage (les constructeurs européens sont bien placés)
- Le modèle économique d'un projet doit prendre en compte **l'intégralité** des services rendus
- Les coûts d'investissement : **de 0,5 à 2 M€/MW de puissance installée** (le suréquipement est moins cher qu'une nouvelle STEP)
- Énergie transférable par cycle > 10 GWh pour les STEP les plus grandes
- **Services aux producteurs et aux fournisseurs** : (optimisation): échelles de temps de l'heure à la journée => **Besoin d'énergie**
- **Services système** : temps caractéristique de la seconde à la minute => **Besoin de puissance**

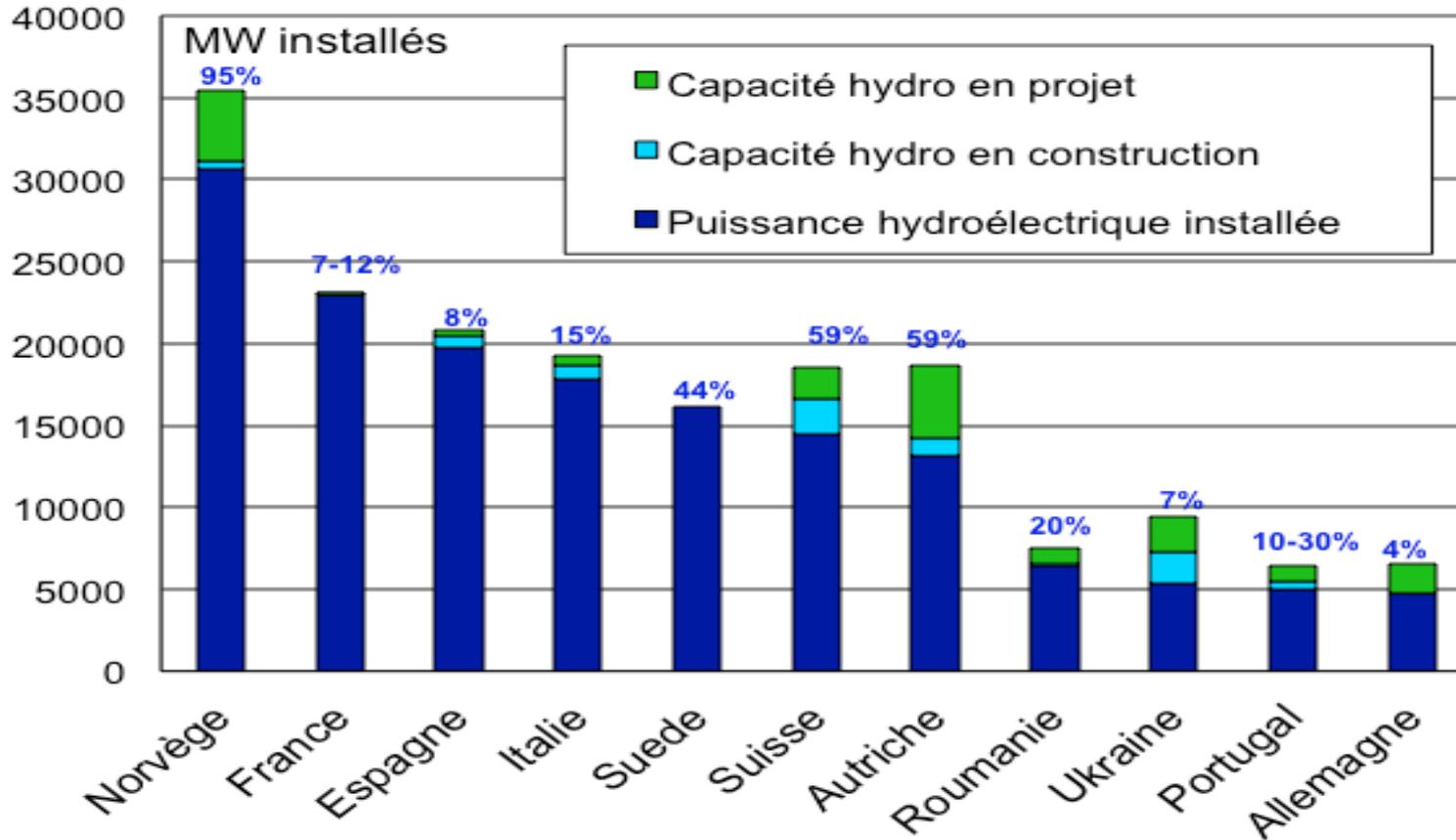
Le Top 9 des pays producteurs d'hydroélectricité



Records 2013-14 en Chine :
 - Le plus haut barrage-voûte (305 m)
 - la turbine la plus puissante (800 MW)

Puissance installée, en construction, en projet (MW) et part de l'hydroélectricité dans le mix énergétique (Source : 2013 world atlas, International Journal on Hydropower and Dams)

Gros plan sur l'Europe



NB. : Y compris les projets de STEP en Allemagne et en Autriche

Puissance installée, en construction, en projet (MW) et part de l'hydroélectrique dans le mix énergétique (Source : 2013 world atlas, International Journal on Hydropower and Dams)

L'énergie hydraulique : le potentiel mondial

Un potentiel hydroélectrique considérable reste à exploiter en Asie, en

Amérique du sud et en Afrique (Données 2011)

