

# Hydroélectricité



Barrage hydroélectrique de Saint Pierre Cognet. (@EDF-Lionel Astruc)

## Sommaire

- [Définition](#)
- [Catégories de centrales](#)
- [Constituants d'une centrale hydroélectrique](#)
- [Part dans la production électrique](#)
- [Mesure de la puissance d'une centrale](#)
- [Avantages et inconvénients](#)

## Définition

L'**énergie hydraulique** est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau quel qu'il soit.

L'**hydroélectricité** ou énergie hydroélectrique consiste à transformer l'énergie cinétique du courant d'eau en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

Une centrale hydroélectrique se compose d'**une retenue d'eau (prise « au fil de l'eau » ou constituée par un barrage)** et d'**une installation de production** mécanique (pour les moulins) ou électrique.

## Quels sont les différents types de centrales hydroélectriques ?

Les centrales gravitaires

Les centrales gravitaires mettent à profit un débit d'eau et un dénivelé. Elles peuvent être classées en fonction du débit turbiné  $Q$  et de leur hauteur de chute  $H$  (puisque leur puissance est égale à  $P = k g Q H$ , exprimée en kW et MW,  $g$  étant l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s<sup>2</sup>) en France et  $k$  le rendement global de l'ordre de 0,8).

### Les centrales au fil de l'eau

Elles utilisent le débit d'un fleuve et fournissent une électricité de base produite « au fil de l'eau » et injectée immédiatement sur le réseau électrique.

Elles nécessitent des aménagements simples et moins coûteux que les centrales de haute chute : ouvrages de dérivation, petits barrages ou seuils servant à dériver une part du débit de la rivière vers la centrale, éventuellement un réservoir lorsque l'on souhaite une production électrique seulement une partie de la journée alors que le débit de la rivière est relativement constant.

Elles sont généralement constituées d'une prise d'eau, d'un tunnel ou d'un canal, puis d'une conduite forcée et d'une usine hydroélectrique située sur la rive de la rivière à laquelle l'eau est restituée. La faible perte de charge (énergie dissipée par le frottement du liquide dans les canaux et les tunnels permet à l'eau de prendre de la hauteur par rapport à la rivière et donc d'acquérir de l'énergie potentielle par rapport à celle-ci.

### Les centrales d'éclusée

Installées dans les grands fleuves à relativement forte pente comme le Rhin ou le Rhône, les centrales d'éclusées sont constituées de barrages sur le fleuve ou sur un canal parallèle au fleuve qui provoquent des suites de chutes d'eau décimétriques qui ne perturbent pas la vallée dans son ensemble grâce à des digues parallèles au fleuve.

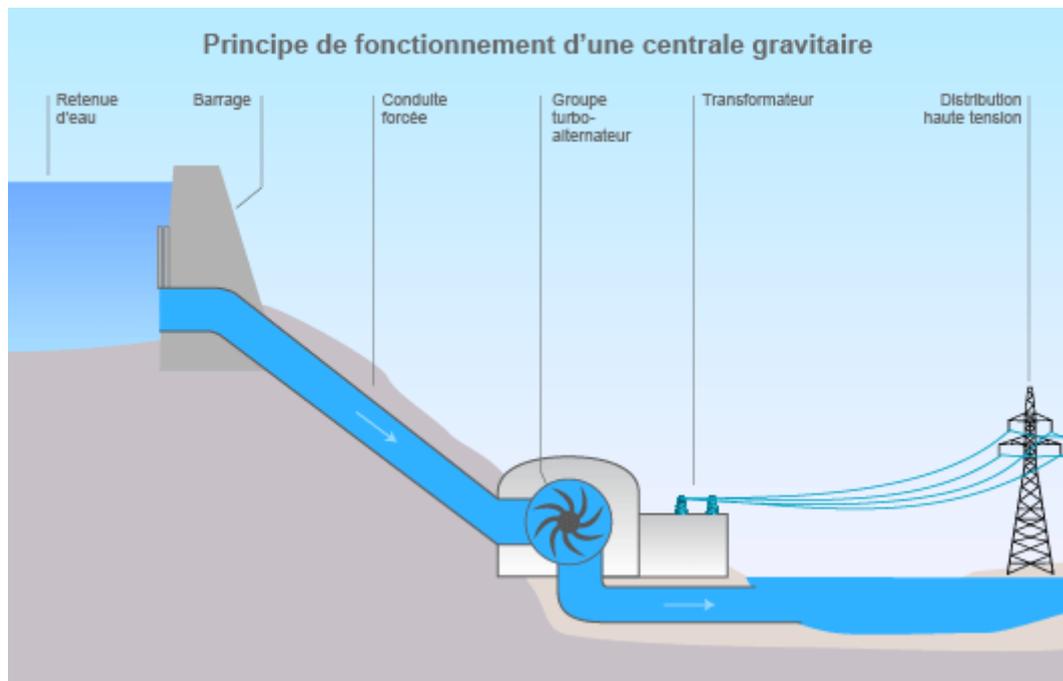
Les usines hydroélectriques placées aux pieds des barrages successifs turbinent l'eau du fleuve de manière cohérente, en trains d'eau. Un même débit est ainsi turbiné sur toute la hauteur d'eau cumulée de la chute d'eau. Une gestion fine de l'eau stockée entre deux barrages permet de fournir de l'énergie de pointe en plus de l'énergie de base et de produire de l'électricité aux heures où elle est le plus nécessaire et à la plus de valeur économique et sociale.

### Les centrales-lacs (ou centrales de hautes chutes)

Ces centrales sont également associées à une retenue d'eau créée par un barrage. Leur réservoir important (**constante de vidage<sup>(3)</sup> de plus de 200 heures**) permet un stockage saisonnier de l'eau et une modulation de la production d'électricité : les centrales de lac sont appelées durant les heures de plus forte consommation et permettent de répondre aux pics. Ces centrales peuvent être annuelles lorsque l'apport en eau permet de les remplir avec une bonne probabilité chaque année ou interannuelles lorsque l'apport de plusieurs années est nécessaire à remplir la retenue du barrage.

Elles sont nombreuses en France. L'usine peut être placée au pied du barrage ou bien plus bas. Dans ce cas, l'eau est transférée par des tunnels en charge du lac jusqu'à l'entrée de la centrale.

La valeur économique de l'usine hydroélectrique dépend de la hauteur de chute et du débit régularisé de la rivière en exploitant de manière optimale les variations de cote de la retenue et donc le volume d'eau turbiné en fonction de la demande du réseau.



Principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire (©Connaissance des Énergies)

Les centrales de haute chute constituent un stockage majeur d'électricité. Le volume de stockage est renouvelé chaque année par les apports en eau et en neige dans le bassin versant de la rivière en amont du barrage. Ce volume est donc dépendant de la pluviométrie et de la nivométrie (mesure de la neige tombée) de l'année considérée.

Les bassins versants concernés sont généralement des bassins-versants de montagne qui sont instrumentés et suivis par de nombreux pluviomètres. Les cycles hydriques et l'évolution climatique de la ressource en eau ont un impact évident sur la production d'électricité. Le décalage thermique de la fonte des neiges et la fonte des glaciers ont un impact sur les débits des rivières à l'amont des barrages.

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

Pour augmenter les capacités de stockage, les stations de transfert d'énergie par pompage (ou STEP) possèdent deux bassins, **un bassin supérieur et un bassin inférieur** entre lesquels est placé un dispositif réversible pouvant aussi bien fonctionner comme pompe ou turbine pour la partie hydraulique et comme moteur ou alternateur pour la partie électrique.

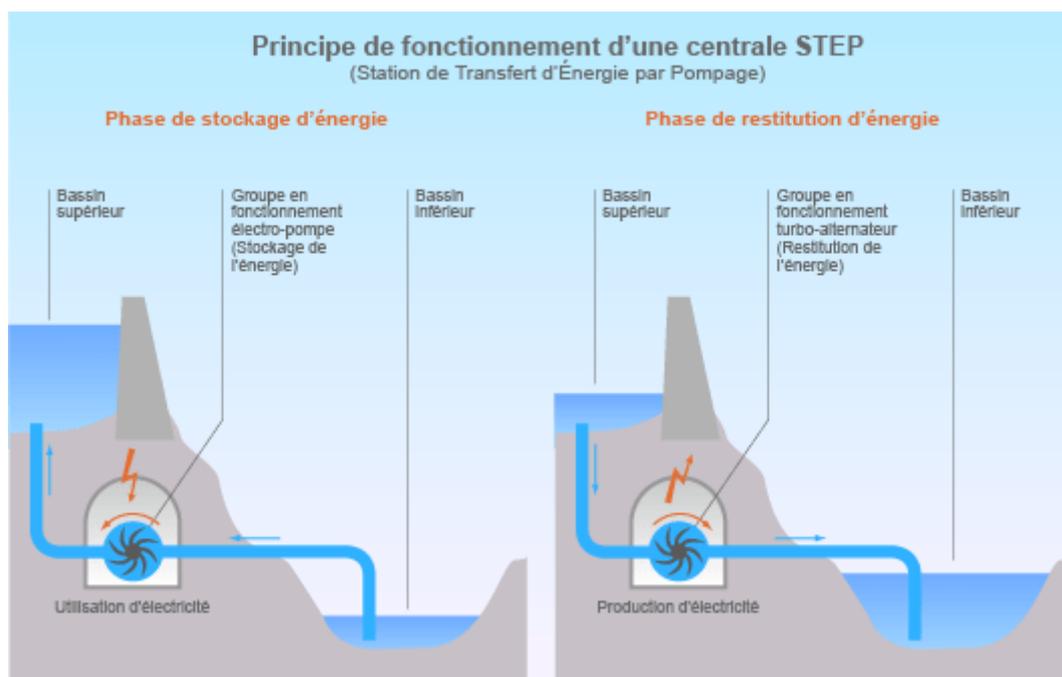
La STEP de la vallée de l'Eau d'Olle se sert, par exemple, du lac du barrage du Verney comme retenue aval et du lac du barrage de Grand'Maison comme retenue amont.

L'eau du bassin supérieur est turbinée en période de forte demande lorsque le réseau appelle de la puissance. Puis, cette eau est pompée depuis le bassin inférieur vers le bassin supérieur durant les périodes où le réseau peut fournir de l'électricité.

**Les STEP consomment de l'électricité pour remonter l'eau turbinée** (elles ne sont pas comptabilisées comme productrices d'énergie de source renouvelable à ce titre). Leur rendement technique dépend des pertes de charges hydrauliques et des rendements des machines

Ce sont des installations de stockage d'énergie. Elles interviennent fréquemment pour des interventions de courte durée à la demande du réseau et en dernier recours (après les autres centrales hydrauliques) pour les interventions plus longues, notamment en raison du coût de l'eau à remonter.

Le **rendement des STEP** entre l'énergie produite et l'énergie consommée est **de l'ordre de 70% à 80%**.



Principe de fonctionnement d'une station de transfert d'énergie par pompage  
(©Connaissance des Énergies)

Les **centrales utilisant l'énergie de la mer** (marémotrices, hydroliennes, houlomotrices) sont décrites dans une fiche spécifique « énergies marines ».

## Répartition des installations en France

La France métropolitaine compte **près de 2 500 installations hydroélectriques**, dont 90% des centrales « au fil de l'eau ».

La puissance totale des installations en France continentale avoisine 25,5 GW et est répartie comme suit :

- Centrales au « fil de l'eau » : 26 %
- Centrales de type « éclusée » : 16 %
- Centrales de « lac » : 40 %
- STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage) : 18 %

## La « petite hydroélectricité » (PHE)

La petite hydroélectricité désigne des installations hydroélectriques de faible puissance (inférieures à 10 MW), dans la grande majorité des ouvrages au fil de l'eau. Selon le niveau de puissance, on qualifie également ces installations de mini, micro ou pico centrales hydrauliques.

La France comptait près de 2 300 installations de petite hydroélectricité en 2019 selon EDF<sup>(1)</sup> (2,2 GW de puissance cumulée), produisant de l'ordre de 6 TWh par an (soit près de 10% de la production hydraulique annuelle en France)<sup>(2)</sup>.

France Hydro Electricité est le syndicat national de la petite hydroélectricité en France.

## Quels sont les constituants des centrales hydroélectriques ?

Les centrales hydroélectriques sont constituées de 2 principales unités :

- **une retenue ou une prise d'eau** (dans le cas des centrales au fil de l'eau) qui permet de créer une chute d'eau, avec généralement un réservoir de stockage afin que la centrale continue de fonctionner, même en période de basses eaux. Un canal de dérivation creusé peut permettre de dériver latéralement l'excédent d'eau arrivant vers un étang de barrage. Un évacuateur de crues permet de faire passer les crues de la rivière sans danger pour les ouvrages ;
- **la centrale hydroélectrique, appelée aussi usine**, qui permet d'utiliser la chute d'eau afin d'actionner les turbines puis d'entraîner un alternateur.

## Les barrages

La conception d'un barrage dépend essentiellement de la forme de la vallée, de sa géologie et des matériaux disponibles sur le site. Le débit extrême des crues à laisser passer joue également un rôle structurant.

Les barrages les plus fréquents, de loin, sont **les barrages en remblai de terre ou d'enrochements** obtenus en carrière par abattage à l'explosif ou prélevés dans des zones d'emprunt dans l'espace de la future retenue.

L'étanchéité est centrale (en matériaux argileux ou en béton bitumineux) ou sur la surface amont (en béton de ciment ou en béton bitumineux). Ce type de barrage s'adapte à des géologies très variées.

Il existe également :

- **des barrages poids** construits d'abord en maçonnerie, puis en béton, puis plus récemment en béton compacté au rouleau BCR qui permet d'importantes économies de temps et d'argent. Le rocher de fondation doit être de bonne qualité ;
- **des barrages voutes en béton** adaptés aux vallées relativement étroites et dont les rives sont constituées de rocher de bonne qualité. La subtilité de leurs formes permet de diminuer la quantité de béton et de réaliser des barrages économiques. Certains sont aussi construits en BCR.

Citons également **les barrages à voutes multiples et à contreforts** qui ne sont plus construits et sont remplacés par les barrages poids en BCR.

## Les turbines

Les centrales hydroélectriques sont équipées de turbines qui transforment l'énergie du flux d'eau en une rotation mécanique de façon à actionner des alternateurs.

Le type de turbine utilisé dépend de la hauteur de la chute d'eau :

- pour les très faibles hauteurs de chute (1 à 30 mètres), des turbines- bulbe sont utilisées, elles peuvent être réversibles et fonctionner en pompe ;
- pour les faibles chutes (5 à 50 mètres) et les débits importants, **la turbine Kaplan** est privilégiée : ses pales sont généralement orientables ce qui permet d'ajuster la puissance de la turbine à la hauteur de chute souvent variable au cours de l'année hydrologique en conservant un bon rendement ;
- **la turbine Francis** est utilisée pour les moyennes chutes (40 à 600 mètres) et moyen débit. L'eau entre par la périphérie des pales et est évacuée en leur centre ;
- **la turbine Pelton** est adaptée aux hautes chutes (200 à 1 800 mètres). Elle reçoit l'eau sous très haute pression par l'intermédiaire d'un injecteur (impact dynamique de l'eau sur l'auget).

Pour les petites centrales hydroélectriques, des turbines à prix bas (et dont le rendement est moins bon) et de concepts simples facilitent l'installation de petites unités.

# Quelle est l'importance de l'énergie hydraulique dans la production d'électricité ?

## En France

Avec 58,8 TWh produits en 2023, l'hydroélectricité est la 2<sup>e</sup> filière productrice d'électricité en France métropolitaine, derrière le nucléaire (64,8%) et devant l'éolien (10,2% en cumulant installations terrestres offshore).

## En Europe

Dans l'Union européenne (UE), l'hydroélectricité a compté pour 11,8% de la production électrique en 2023 selon les dernières données d'Ember, ce qui en fait la 5<sup>e</sup> filière productrice d'électricité (la 2<sup>e</sup> renouvelable), après le nucléaire (22,9%), l'éolien (17,3%), le gaz naturel (16,8%) et le charbon (12,3%).

## Dans le monde

La Chine se distingue comme le principal producteur d'électricité avec 1 304 TWh, représentant 30,1 % de la production mondiale. Cette domination est notable, mais il est également important de noter que cette production ne représente que 17,4 % de la production électrique nationale chinoise, ce qui montre la forte demande énergétique intérieure du pays. En comparaison, le Brésil, avec une production de 398 TWh, représente 9,2 % du total mondial, mais cette production constitue 63,5 % de la production électrique nationale brésilienne, soulignant la dépendance du pays à ses ressources renouvelables.

En examinant d'autres pays, la Norvège se démarque avec 126 TWh de production, représentant 2,9 % de la production mondiale mais une part remarquable de 93,4 %

de la production nationale, indiquant une forte utilisation des énergies renouvelables. Les États-Unis, bien que produisant 311 TWh (7,2 % du total mondial), n'utilisent les renouvelables que pour 7,1 % de leur production nationale, reflétant une diversité énergétique plus large mais une part relativement faible des renouvelables. Enfin, le reste du monde contribue à 27,7 % de la production mondiale, ce qui montre une dispersion significative des capacités de production électrique renouvelable à l'échelle globale. Ces données indiquent une disparité marquée dans l'utilisation des sources d'énergie renouvelables, tant en termes de volumes de production que de dépendance nationale aux énergies vertes.

Production d'électricité hydraulique par pays - AIE 2021			
Pays	Production (TWh)	% total Monde	% de la production électrique nationale
Chine	1 304	30,1	17,4
Brésil	398	9,2	63,5
Canada	380	8,8	58,8
États-Unis	311	7,2	7,1
Russie	197	4,5	17,5
Inde	172	4,0	10,6
Norvège	126	2,9	93,4
Turquie	89	2,1	29,2
Japon	88	2,0	8,4
Vietnam	66	1,5	27,8
Reste du monde	1 199	27,7	14,2
Monde	4 329	100	16,0

L'analyse des données sur la capacité hydraulique installée par pays révèle que la Chine est de loin le leader mondial avec 356 GW, représentant une part substantielle de la capacité hydraulique mondiale totale de 1 308 GW. Cette domination est due à l'investissement massif de la Chine dans les infrastructures hydroélectriques, qui jouent un rôle crucial dans son mix énergétique renouvelable. En comparaison, le Brésil et les États-Unis suivent avec respectivement 110 GW et 103 GW, ce qui montre leur engagement important mais moindre en termes de volume par rapport à la Chine. Le Canada, avec 81 GW, et la Russie, avec 54 GW, complètent le top cinq des pays ayant les plus grandes capacités installées, reflétant leur richesse en ressources hydriques et leur long historique d'exploitation de l'énergie hydroélectrique.

Un autre élément marquant est la contribution significative du reste du monde, qui cumule 417 GW, soit environ 31,9 % de la capacité mondiale. Cette répartition indique une adoption généralisée de l'hydroélectricité à travers de nombreux pays, bien que souvent à des échelles moindres comparées aux leaders comme la Chine et le Brésil. Des pays comme la Norvège et la France, avec respectivement 33 GW et 26 GW, montrent une utilisation intensive de l'énergie hydroélectrique, souvent en raison de leur topographie favorable et de leur politique énergétique axée sur les renouvelables. En somme, la répartition de la capacité hydraulique installée illustre à

la fois les disparités et les efforts communs à l'échelle mondiale pour exploiter l'énergie hydroélectrique comme une source d'énergie renouvelable majeure.

Capacité hydraulique installée - AIE 2021	
Pays	Capacité hydraulique installée (GW)
Chine	356
Brésil	110
États-Unis	103
Canada	81
Russie	54
Japon	50
Inde	49
Norvège	33
Turquie	29
France	26
Reste du monde	417
Monde	1 308

Au niveau mondial, l'hydroélectricité reste de loin la principale filière renouvelable d'électricité et la 3<sup>e</sup> toutes filières confondues (14,3% du mix électrique mondial en 2023), derrière le charbon (35,4%) et le gaz naturel (22,5%).

Les plus grands producteurs hydroélectriques dans le monde sont **la Chine (1 303,1 TWh en 2023)**, **le Brésil (427,1 TWh)** et **le Canada (398,4 TWh)**.

Le plus grand projet de centrale électrique au monde est un barrage hydroélectrique en Chine : terminé depuis 2006, le barrage des Trois Gorges, long de 2 309 m et haut de 185 m, disposerait d'une puissance de 18,2 GW grâce à ses 26 turbines, soit l'équivalent de la puissance de plus de 10 réacteurs EPR (le facteur de charge de ces centrales doit être bien pris en compte pour pouvoir les comparer en matière de production).

Une dizaine de pays, dont quatre en Europe, produisent plus de la moitié de leur électricité grâce à l'hydraulique. La Norvège vient en tête, suivie par le Brésil, la Colombie, l'Islande, le Venezuela, le Canada, l'Autriche, la Nouvelle Zélande et la Suisse.

## Comment mesurer la puissance d'une centrale hydraulique ?

La puissance d'une centrale hydraulique peut se calculer par la formule suivante:

$$P = Q.p.H.g.r$$

Avec :

- P : puissance (exprimée en W) ;
- Q : débit moyen mesuré en mètres cube par seconde ;

- $\rho$  : masse volumique de l'eau, soit 1 000 kg/m<sup>3</sup> ;
- H : hauteur de chute en mètres ;
- g : constante de gravité, soit près de 9,81 (m/s/s) selon l'emplacement géographique ;
- r : rendement de la centrale (compris entre 0,6 et 0,9)

## Quels sont les avantages et inconvénients de l'énergie hydraulique ?

### Coût et rentabilité de la production

La construction de barrages est caractérisée par des investissements d'autant plus élevés que la hauteur de chute est importante et que la vallée est large. Ces dépenses d'investissements diffèrent fortement selon les caractéristiques de l'aménagement et les dépenses annexes liées aux contraintes sociales et environnementales, en particulier le coût des terrains expropriés.

- Le LCOE dépend énormément de l'usage de l'électricité et du facteur de charge de l'usine. L'alimentation en continu d'un smelter (fonderie) d'aluminium est très spécifique. Les prix sont très bas sous la pression des aluminiers car l'électricité est une part très importante du prix. Ceci pourrait être analogue pour l'hydrogène vert par électrolyse.
- Pour le CAPEX, **un ordre de grandeur pour les grands projets est 2 000 € par kW** (mais ce montant peut être nettement inférieur).

Les avantages économiques liés à la capacité de modulation de la production d'électricité permettent de rentabiliser ces investissements car la ressource hydraulique est gratuite et les frais d'entretien sont réduits.

### Source d'électricité bas carbone

L'hydroélectricité fait partie des filières productrices d'électricité émettant le moins de CO<sub>2</sub> le long de leur vie. Ses émissions avoisinent 6 g de CO<sub>2</sub> par kWh en France.

Elle contribue ainsi à la faible intensité carbone de la production française d'électricité (aux côtés du nucléaire). Dans le reste de l'Europe, « *seuls quelques pays dotés des mix de production les plus décarbonés, notamment les pays disposant d'une production hydraulique abondante, comme la Suède, la Norvège, la Suisse ou l'Autriche, ont atteint une intensité carbone comparable à celle de la France* », souligne le gestionnaire du réseau de transport d'électricité RTE.

### Quelles sont les émissions de CO<sub>2</sub> par source d'énergie ? (Sélectra)

Il y a également eu de grands débats sur les émissions de CH<sub>4</sub> dans les retenues (il y a convergence pour dire que ces émissions durent environ 5 ans). Ensuite le comportement du lac est analogue à celui d'un lac naturel.

L'impact du ciment est lui reconnu ( $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). Cela conduit à concevoir des projets avec relativement peu de ciment (les carburants des engins et les aciers sont étudiés par ailleurs).

## Prévisibilité, précipitations et sécheresses

L'énergie hydraulique permet de répondre aux besoins d'ajustement de la production électrique, notamment en stockant de l'eau dans de grands réservoirs au moyen de barrages ou de digues. Les fluctuations annuelles de la production hydraulique sont cependant importantes. Elles sont essentiellement liées aux précipitations.

La production peut croître de 15% les années où la ressource hydraulique est forte et diminuer de 30% les années de grande sécheresse.

En 2022, la production hydraulique en France métropolitaine a baissé de 12 TWh et atteint son plus bas niveau depuis 1976, dans le contexte de sécheresse en France (avec des précipitations inférieures de 25% aux normales).

## Impact social et environnemental

Il est parfois reproché à l'énergie hydraulique d'engendrer des déplacements de population, les rivières et les fleuves étant des lieux privilégiés pour installer des habitations. Par exemple, le barrage des Trois Gorges en Chine a entraîné le déplacement de près de deux millions de personnes.

En raison d'une régulation modifiée de l'eau, les écosystèmes en amont et en aval des barrages peuvent être perturbés (notamment la migration des espèces aquatiques) bien que des dispositifs comme les passes à poissons soient installés.

## Quels dangers ?

La majorité des barrages sont dédiés à la fourniture d'eau à l'irrigation, à la protection contre les crues et à l'eau domestique et industrielle. Certains à l'alimentation des canaux ou aux loisirs. **Les barrages dédiés à la production d'électricité représente environ 25% du nombre total de barrages.**

Bien que très rares, les ruptures de barrages peuvent occasionner de grands dégâts dans la vallée située à l'aval du barrage. C'est pour cela que des systèmes d'alertes sont installés en France et dans beaucoup de pays.

En 1975, **la rupture du barrage de Banqiao**, en Chine a eu des conséquences particulièrement dramatiques : le bilan humain est estimé entre 26 000 morts (dernière estimation officielle – contestée – pour les victimes directes) à plusieurs centaines de milliers de victimes (en incluant les personnes ayant péri à cause de la famine provoquée par cet accident). Le barrage de Banqiao faisait partie d'un grand ensemble de barrages pour l'irrigation et la protection contre les crues construit par des ingénieurs russes durant une période politiquement complexe. Les crues avaient été très sous-estimé et l'ensemble des barrages s'est rompu durant une crue très

supérieure aux estimations. La contribution énergétique de ce barrage est faible. C'est un problème de barrage et non pas d'hydroélectricité.

En [juin 2023](#), la destruction partielle du barrage de **la centrale hydroélectrique de Kakhovka** en Ukraine a été provoquée par un sabotage délibéré des vannes en rive gauche (qui ont entraîné des érosions régressives et une rupture partielle du barrage).

**Le barrage de Malpasset** (rupture en 1959, 423 morts) n'était pas équipé d'une usine hydroélectrique.

### Le saviez-vous ?

Les barrages moulins existent probablement depuis la préhistoire mais c'est au Moyen-âge qu'ils se sont fortement développés en Europe pour alimenter les moulins à eau, moudre le blé, fouler le lin, préparer le cuir, alimenter les martinets et les forges, etc.

Progressivement, les moulins sont associées à des retenues amont créés par des petits barrages en terre et maçonnerie pour stocker l'eau, augmenter la période de fonctionnement du moulin à la saison sèche (régulation saisonnière) et permettre une plus grande puissance pendant les heures d'ouverture du moulin (régulation journalière).

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la turbine remplace la roue hydraulique et les premiers barrages destinés à la production d'électricité font leur apparition, ce qui permet d'éloigner les usines des rivières et de partager l'électricité produite par des unités de tailles croissantes.

dernière modification le [21 mai 2024](#)