



## L'hydraulique

Claude Acket

### Résumé

Nous ne pouvons parler d'énergie dans l'absolu lorsqu'il s'agit de l'hydraulique. Il faut parler de l'énergie potentielle que représente une masse d'eau stockée en altitude, dans un champ de pesanteur. La baisse d'altitude transformera ce potentiel en énergie cinétique de cette même masse d'eau. Cette énergie cinétique donnera à son tour de l'énergie mécanique, qui se transformera en énergie électrique.

C'est la « nature » qui remontera l'eau à son potentiel d'origine, et le « moteur » de ce relevage est le cycle de l'eau fondé sur l'énergie calorifique solaire.

L'énergie hydraulique recouvre des réalités très variées, tant par la taille des ouvrages que par les débits et les hauteurs de chute. On trouvera des centrales au fil de l'eau installées en général en plaine, c'est le fleuve qui a façonné la plaine et imposé sa faible pente, d'où des faibles dénivelées et hauteurs de chute, mais de forts débits. On trouvera des centrales dites « d'éclusée » généralement situées en moyenne montagne, sur des cours d'eau à débits importants associés à des lacs et hauteurs de chute entre 25 et 300 mètres. On trouvera enfin les centrales de lac (barrages de hautes chutes) situées en altitude dans des sites de montagne, bénéficiant pour des débits parfois faibles de très importantes dénivelées. L'ensemble représente une puissance de 21 100 MW d'équipement et produit en année moyenne 65 TWh, soit un facteur de charge de 35 %.

A ces installations il faut ajouter les STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) obtenues en ajoutant à une centrale de lac un dispositif artificiel de pompage qui peut remonter l'eau d'un second lac « bas » de réception/recueil. Pour une puissance cumulée de 4 500 MW en production, les STEP transforment 5,5 TWh consommés pendant les heures creuses en 3,9 TWh produits pendant les heures pleines. (rendement global : 70 %).

Ce potentiel hydraulique ne devrait pas augmenter significativement dans l'avenir, pratiquement tout ayant déjà été fait. En étant optimiste, au mieux la capacité de nouveaux équipements y compris la micro hydraulique sera limitée (+ 1 000 MW par rapport à 2010 ?)

La faiblesse du facteur de charge de l'hydraulique pourrait laisser croire que cette source d'électricité est d'un intérêt limité pour assurer la réponse aux besoins d'électricité. En fait la capacité de stockage de l'eau et la facilité de modulation de la production lui donnent un atout majeur pour l'ajustement permanent de l'équilibre consommation/production.

D'une manière générale, les centrales hydroélectriques sont très chères en investissement, (avec correction facteur de charge), mais ces investissements sont en général prévus durer longtemps (plus de 100 ans). A côté elles sont peu coûteuses en fonctionnement : le combustible est gratuit et l'exploitation et la maintenance ont des coûts réduits. Selon les sites, les coûts de production varient de 30 à 80 €/MWh, chiffres valorisés par la souplesse d'exploitation.

A première vue, l'hydraulique, énergie renouvelable, sans aucun lien avec le cycle du carbone, ne peut affecter l'effet de serre. Pour l'ensemble du cycle de vie, qui inclut les rejets indirects

(comme la fabrication du béton) dans la phase de construction, ces rejets sont évalués à environ 5 g de CO<sub>2</sub> par kWh, ce rejet est un des plus bas de toutes les sources de production d'électricité.

Toutefois, un point spécifique peut affecter défavorablement ce bilan si on prend en compte les conséquences de mise en eau d'immenses espaces forestiers sans déforestation préalable. Une partie de la matière organique piégée sous l'eau va se décomposer en méthane, puissant gaz à effet de serre.

Mais cette vision environnementale, globalement très positive, doit être nuancée si on considère les risques d'accidents graves. Selon les bilans de l'OMS, depuis 1970, l'hydraulique arrive largement en tête de la mortalité due à des accidents majeurs avec 230 000 morts au niveau mondial, loin devant le charbon, le gaz et le pétrole. Mais il faut noter que ces derniers se distinguent par la multitude des petits accidents non classés en majeurs et, en les intégrant, ils sont finalement plus meurtriers ramenés à l'énergie produite.

## A) Le cycle de l'eau, du soleil à l'électricité

L'énergie hydraulique est d'une nature différente de celle des énergies issues des combustibles fossiles et de la biomasse. Contrairement à ces dernières, pour lesquelles la réaction chimique qui va produire de l'énergie calorifique se traduit par la destruction ou un changement de la matière, nous n'avons, pour l'hydraulique, ni changement de nature chimique ni disparition de matière. Ainsi, l'eau se retrouvera telle quelle en fin de cycle, sans perte de masse hormis quelques « fuites » éventuelles ; fuites qui retourneront dans le cycle global de l'eau.

En fait, nous ne pouvons parler d'énergie dans l'absolu lorsqu'il s'agit de l'hydraulique. Il faut parler de l'énergie potentielle que représente une masse d'eau stockée en altitude, dans un champ de pesanteur. La baisse d'altitude transformera ce potentiel en énergie cinétique de cette même masse d'eau. Cette énergie cinétique donnera à son tour de l'énergie mécanique, qui se transformera en énergie électrique.

C'est la « nature » qui remontera l'eau à son potentiel d'origine, et le « moteur » de ce relevage est le cycle de l'eau. Ce cycle est fondé sur l'énergie calorifique solaire. L'évaporation est source de tous les échanges. La chaleur du soleil fournit l'énergie pour évaporer l'eau, directement à partir des surfaces liquides (océans, lacs, rivières, etc.) et indirectement par la transpiration des plantes dont le concours reste globalement faible.

## B) Les divers types d'aménagement hydroélectrique

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivée dans les prises d'eau des fleuves ou des rivières (au fil de l'eau) représente une énergie potentielle. La diminution de l'énergie potentielle de cette eau entre les deux niveaux amont et aval produira de l'énergie cinétique du fluide. Cette dernière se transformera en énergie mécanique en entraînant la turbine et l'alternateur ce qui donnera en définitive de l'énergie électrique.

Avec un rendement global compris entre 85 et 90 %, une énergie potentielle gravitaire se transforme en « énergie électrique ». De façon simplifiée, nous pouvons retenir :

- 1 m<sup>3</sup>/seconde qui chute de 100 mètres génère 0,85 MW.

- 1 m<sup>3</sup> d'eau qui descend de 400 mètres produit 1 kWh.

Quelques exemples d'installations :

- Cleuson (Suisse) : 1 874 mètres de chute, débit 75 m<sup>3</sup>/sec, puissance 1 269 MW ;
- 3 Gorges (Chine) : 80 mètres de chute, débit 27 600 m<sup>3</sup>/sec, puissance 18 200 MW ;
- Génissiat : 67 mètres de chute, débit 750 m<sup>3</sup>/sec, puissance 420 MW ;
- Donzère : 21 mètres de chute, débit 1 970 m<sup>3</sup>/sec, puissance 352 MW.

L'énergie hydraulique recouvre des réalités très variées, tant par la taille des ouvrages que par les débits et les hauteurs de chute. Pour la même puissance, débit et hauteur varient à l'inverse l'un de l'autre, une turbine pouvant être alimentée par un faible débit sous une hauteur de chute importante, ou au contraire par un débit important sous une faible hauteur de chute.

Un classement peut être fait par la puissance des ouvrages.

Cette puissance va de quelques kilowatts (micro hydraulique) pour les réseaux régionaux ou locaux à des centaines ou des milliers de mégawatts pour les réseaux interconnectés.

Un classement peut également être fait selon la hauteur de chute :

- les hautes chutes (> 200 m), associées à des lacs de montagne ;
- les moyennes chutes (entre 50 et 200 m), sur les fleuves et rivières en montagne ;
- les basses chutes (< 50 m), dont les centrales « au fil de l'eau ».

Les aménagements peuvent ou non comporter une réserve d'eau qui peut-être naturelle ou le plus souvent artificielle.

### Les centrales au fil de l'eau

Les centrales au fil de l'eau sont en général installées en plaine. C'est le fleuve ou la rivière qui a façonné la plaine et imposé sa pente.

Pour ce type d'aménagement, un canal dérivé, dit canal d'amenée où sera montée l'usine hydroélectrique est en général créé. Un barrage, dit de retenue, est placé sur le lit naturel du fleuve, obligeant l'essentiel du courant à passer par le canal dérivé, sauf en cas de crue.

Ces équipements utilisent le débit du fleuve tel qu'il se présente et n'ont pas de capacité significative de modulation par stockage. Le temps nécessaire pour vider la réserve d'eau amont, appelé « constante de vidange », est généralement de l'ordre de l'heure. Ces centrales n'ayant pas de réserves significatives d'eau relativement à leur débit, fournissent ainsi de l'électricité en base.

Le débit du fleuve varie en fonction du mois de l'année. Les installations de récupération d'énergie seront en général dimensionnées pour le débit du mois moyen maximum, par exemple le mois de mars sur le bas Rhône. Mais il faut aussi prendre en compte les écarts par rapport à la

moyenne, et notamment les sur-débits de crues qui, via le barrage de retenue, passeront par le lit naturel.

En France, la puissance cumulée de ces centrales représente 7 500 MW. En année moyenne, elles produisent 37,3 TWh, ce qui donne un taux d'utilisation de 57 % (5 000 heures par an).

### **Les centrales dites « d'écluse »**

Ces équipements sont généralement situés en moyenne montagne, sur des cours d'eau à débits importants associés à des lacs et hauteur de chute entre 25 et 300 mètres.

La constante de vidange est comprise entre quelques heures et quelques centaines d'heures (20 heures pour Génissiat). La présence du lac permet de moduler tout au long de la journée, voire de la semaine, la puissance produite. Pendant les heures de forte demande, ces centrales sont utilisées à leur puissance maximale, en tirant sur la réserve : c'est le fonctionnement dit « en écluse ». Pendant les heures de faible demande, où si celle-ci est fournie par d'autres producteurs, la puissance est ramenée à zéro et la réserve non entamée.

En France, la puissance cumulée de ces centrales représente 4 300 MW. Elles produisent en année moyenne 14 TWh, d'où un taux d'utilisation de 37 % (3 250 heures par an).

### **Les centrales de lacs (barrages de hautes chutes)**

Ces centrales, situées en altitude dans des sites de montagne, bénéficient, pour des débits parfois faibles, de très importantes dénivelées. Elles disposent, relativement au débit, de grandes retenues d'eau, ce qui permet une durée de fonctionnement à pleine puissance supérieure à quelques centaines d'heures par an. Leur rôle peut être typiquement saisonnier, avec par exemple les apports en eau du printemps. Elles sont capables d'augmenter très rapidement leur production.

En France, la puissance cumulée de ces centrales représente 9 300 MW. En moyenne annuelle, elles produisent 17,4 TWh, d'où un taux d'utilisation de 19 % (1 800 heures par an).

### **Les STEP : Station de Transfert d'Énergie par Pompage**

En entrant dans le domaine des STEP, nous sommes à la limite du cadre de la production directe d'énergie, puisque ces installations sont en fait des consommatrices nettes d'énergie. En ajoutant à une centrale de lac un dispositif artificiel de pompage qui peut remonter l'eau dans ce lac, que nous désignerons comme le lac supérieur, nous obtenons une STEP. Il ne s'agit pas, bien sûr, de pomper l'eau à mesure qu'elle s'écoule mais de pomper celle qui a été déversée antérieurement et stockée dans un lac inférieur. L'exploitation de l'installation en mode pompage permet de stocker l'énergie produite par d'autres types de centrales lorsque la consommation est basse, la nuit par exemple, pour ensuite la redistribuer, lors des pics de consommation, en mode turbinage. Si le lac supérieur est aussi alimenté par les eaux des versants, l'installation est dite « mixte », sinon elle est dite de pompage « pur ». La puissance cumulée de l'ensemble des STEP est de 4 500 MW en production. Elles transforment 5,5 TWh consommés pendant les heures creuses en 3,9 TWh produits pendant les heures pleines. (rendement global 70 %).

L'ensemble du type mixte de Grand-Maison, est la plus puissante STEP en France. Le lac supérieur, situé à 1 698 mètres d'altitude, a une capacité de 137 Mm<sup>3</sup>. Le lac inférieur du Verney, situé à l'altitude de 725 mètres, a une capacité de 14 Mm<sup>3</sup>. En turbinage à la puissance maximale de 1 800 MW, le lac supérieur se viderait en environ 200 heures. En pompage à la puissance maximale de 1 400 MW le lac inférieur se viderait en 27 heures.

## C) Hydraulique et suivi réseau électrique

Avec 25 500 MW d'équipements, l'hydraulique représente 21 % du total de la puissance installée toutes sources confondues, mais produit seulement environ 12 % de l'énergie. Si cet écart est la résultante d'un facteur de charge (hors STEP) de 37 % apparemment défavorable, il cache en fait un atout considérable : la flexibilité de production et la capacité d'adaptation aux besoins du réseau électrique.

Or, ces besoins varient en permanence selon deux cycles : le saisonnier et le journalier. Si les variations saisonnières sont lentes et s'étalent sur plusieurs mois, celles journalières voisines de 20 000 MW sont très rapides, avec des vitesses de variations proches de 10 %/heure. Il appartient aux producteurs de s'adapter à ces variations de charge et dans cette mission, c'est l'hydraulique qui assume la plus grande part, qui peut aller au-delà de 10 000 MW en variations rapides. Cet apport de variabilité est essentiel, mais insuffisant à ce jour et les autres sources, y compris celles qui sont classées habituellement « sources de base » comme le nucléaire, sont aussi sollicitées pour assurer l'équilibre réseau.

L'arrivée de nouveaux systèmes productifs renouvelables, dont les puissances mises sur le réseau ne peuvent être réglées en fonction des besoins (fonctionnement dit « en déversoir ») et qui en outre sont très variables et aléatoires, va accentuer le besoin de modulation des autres producteurs d'électricité pour éviter les manques, mais aussi les excédents de fourniture.

La modulation journalière actuelle de l'hydraulique qui peut atteindre et légèrement dépasser les 10 000 MW, pour répondre aux seules variations de consommation, devra être adaptée pour prendre aussi en compte en partie les variations des éoliennes. En période de forte production des éoliennes la production des centrales de lac et d'éclusées peut être plus réduite qu'actuellement en préservant ainsi la réserve d'eau, utilisable lors des périodes de faible production de l'éolien dans les jours suivants. Pendant quelques jours ceci peut donner une marge de manœuvre de 5 000 à 10 000 MW, mais ne répond pas à des périodes sans vent de plusieurs semaines. De son côté la voie visant plus de STEP a ses limites. Par exemple il faudrait installer environ 20 Grand Maison pour, indépendamment des autres équipements, compenser les fluctuations des puissances installées de 31 GW d'éolien prévues dans le Grenelle,

## D) Les coûts de l'hydraulique terrestre

D'une manière générale, les centrales hydroélectriques sont très chères en investissements, (avec correction facteur de charge), mais ces investissements sont en général prévus durer longtemps (plus de 100 ans). A côté, elles sont peu coûteuses en fonctionnement. Le combustible est gratuit et l'exploitation et la maintenance ont des coûts réduits. L'investissement peut représenter plus de 85% du coût du kWh,

Il n'est pas possible de donner une référence absolue du coût d'investissement de l'hydraulique, car à chaque site correspondent des aménagements spécifiques.

Le dernier chiffre connu d'investissement d'une installation terminée concerne le barrage des 3 Gorges. La Chine annonce un coût de 25 milliards de \$, c'est-à-dire 18 milliards d'€ (début 2010), soit environ 1 000 €/kW installé. L'analyse du détail des coûts et du mode de calcul chinois conduit certains analystes à multiplier ce chiffre par 2. L'estimation « occidentale » du plus grand projet mondial, celui de Grand Inga sur le fleuve Congo, donne un coût de 80 milliards de dollars, ce qui reviendrait à 2 000 €/kW. En Europe, un chiffre moyen de 1 500 €/kW actualisé est avancé pour les équipements passés.

Sur la base de 2 000 €/kW et un facteur de charge de 44 % (3 850 heures par an) avec un taux de 5% et une durée de vie de 40 ans (la réalité sera probablement plus de 100 ans, mais pour de telles durées l'écart pris en compte amortissement devient négligeable) la part investissement est de 30 €/MWh. En ajoutant l'exploitation un ordre de grandeur de 35 €/MWh peut être retenu pour le coût total. Mais il pourra varier entre 20 et 80 selon les sites.

## E) Impact environnemental, rejets de gaz carbonique

A première vue, l'hydraulique, énergie renouvelable sans aucun lien avec le cycle du carbone, donc avec les rejets de gaz carbonique, ne peut affecter l'effet de serre. Mais cette affirmation, évidente du fait de l'absence de combustible, n'est pas suffisante pour juger d'une filière énergétique. Il faut regarder l'ensemble du cycle de vie, qui inclut les rejets dans la phase de construction. Pour l'hydraulique, ces rejets, évalués à environ 5 g de CO<sub>2</sub> par kWh produit, s'avèrent dans tous les cas les plus bas de toutes les sources de production d'électricité. A titre de comparaison ce chiffre atteint 1 000 pour les centrales au charbon et descend à 430 pour les centrales au gaz CCG.

*Nota : L'essentiel de la production indirecte de gaz carbonique en phase de chantier vient du béton, l'hydraulique monopolisant d'énormes quantités de béton, au même titre que le nucléaire et l'éolien).*

Toutefois, un point spécifique peut affecter défavorablement le bilan effet de serre de l'hydraulique si on prend en compte les conséquences de mise en eau d'immenses espaces forestiers sans déforestation préalable. Une partie de la matière organique piégée sous l'eau va se décomposer en méthane, puissant gaz à effet de serre (au moins 20 fois plus puissant que le gaz carbonique à même masse).

Mais cette vision environnementale plutôt positive doit être nuancée, si on considère les risques d'accidents graves. Selon l'OMS, l'hydraulique arrive largement en tête des accidents majeurs pour la période 1970 et 2001, bien devant le charbon le gaz et le pétrole. Ces derniers se caractérisent plus par la multitude des petits accidents non classés en majeurs. Ces relevés d'accidents graves incluent notamment, les 230.000 morts au Hénan (Chine), les 30.000 du Machlu en Inde et globalement 4.015 morts comptabilisés dans un total de 13 accidents. Si nous regardons géographiquement plus près de nous, mais avant 1970, nous retenons en France, le barrage de Malpasset et ses 423 morts en 1959 et en Italie le barrage de Vajont et ses 2 600 morts en 1963.

L'impact des centrales hydroélectriques sur l'environnement se rapporte surtout aux modifications de paysage et parfois aux déplacements de populations. (nous avons en mémoire les 400 habitants déplacés du village de Tignes, mais ce n'est rien par rapport aux

plus du million de personnes déplacées pour les 3 Gorges en Chine, pour il est vrai une puissance 100 fois plus importante). En outre, les morphologies des cours d'eau étant plus ou moins modifiées, la faune et la flore peuvent également être affectées.

## **F) Hydraulique, perspectives**

En France, comme pour le reste de l'Europe, pratiquement tous les sites hydrauliques potentiellement valables sont déjà équipés. Nos anciens ont bien travaillé et investi à bon escient. Des aménagements limités, comme celui de Romanche-Gavet qui ne fait qu'augmenter une puissance de + 10 MW (passage de 82 à 92) et une production de + 155 MWh, ne permettrons pas d'aller bien loin. En étant optimiste, au mieux la capacité de nouveaux équipements y compris la micro hydraulique sera limitée (+ 1 000 MW par rapport à 2010 ?). Donc, comme les besoins en électricité semblent devoir s'accroître, la part relative de l'hydraulique devrait décroître.

Hors de l'Europe les potentiels de croissance sont par contre significatifs. Ils concernent l'Asie (la Chine planifie au moins un autre équivalent 3 Gorges), l'Amérique latine et surtout l'Afrique, ce dernier continent étant le plus en retard par rapport à son potentiel. Parmi les grands projets, citons le barrage de Belo Monte au Brésil d'une puissance de 11 000 MW dont la construction vient d'être décidée. Enfin, encore à une plus grande échelle, le barrage de Grand Inga sur le fleuve Congo est à l'étude. Pour une puissance de 39 000 MW, deux fois plus puissant que celui des Trois Gorges, il pourrait représenter un tiers de l'approvisionnement électrique actuel du continent africain. Mais pour ce continent plus que pour d'autres se pose la difficulté de faire face aux investissements importants que cette filière de production d'électricité nécessite.

Dans le monde, un triplement de la production d'énergie hydraulique est envisageable. Les estimations les plus optimistes au niveau mondial donnent un potentiel de production de 8 500 TWh/an (3 fois plus qu'actuellement). Ceci suppose une puissance installée un peu supérieure à 2 200 GW, mais au rythme actuel de 12 GW/an, il faudrait plus de 120 ans pour arriver à ce potentiel.