

## L'énergie hydraulique à l'heure du changement climatique

Yves Giraud

L'hydroélectricité constitue dans le monde la troisième source de production d'électricité après le charbon et le gaz (entre 15 et 17 % de la production mondiale), et la deuxième en France, où la production d'électricité est majoritairement nucléaire.

Après les canicules et les sécheresses qui ont sévi dans le monde ces dernières années, notamment en 2022 en France, nombreux sont ceux qui s'interrogent sur l'avenir de l'hydroélectricité dans le changement climatique : la première des énergies renouvelables électriques serait-elle menacée? Comment l'enjeu énergétique pourrait-il être composé avec les multiples pressions des utilisateurs de l'eau, qui se fera de plus en plus rare? Les grands lacs de barrage, comme celui de Serre-Ponçon dans les Hautes-Alpes, ou, plus loin de chez nous, les immenses lacs du Colorado en plein désert qu'on a désormais beaucoup de mal à remplir, seraient-ils condamnés?

### **Il faut d'abord rappeler que l'hydroélectricité est essentielle dans la lutte contre le changement climatique**

Représentant, nous l'avons dit, plus de 15 % de la production électrique mondiale, l'hydroélectricité est de fait la première source d'électricité décarbonée dans le monde, loin devant le nucléaire (10 %). Elle est aussi la première énergie renouvelable électrique (54 % en 2021), loin devant l'éolien et le solaire. Elle est même «doublement renouvelable», au sens où sa flexibilité (possibilité de faire varier rapidement sa puissance) permet au réseau d'intégrer davantage d'éolien et de solaire, qui fluctuent au gré du soleil et du vent. Elle dispose encore d'un

potentiel de développement considérable en Asie, Afrique et Amérique latine, ainsi que sur l'ensemble de la planète pour le pompage-turbinage que nous aborderons plus loin. L'Agence Internationale de l'Énergie souligne son rôle et son potentiel dans son *Hydropower Special Market Report* de 2021. Pour l'IRENA, l'agence internationale des énergies renouvelables, 1300 GW de capacités hydroélectriques devraient ainsi être développées, soit un doublement des capacités actuelles, pour atteindre l'objectif climatique de l'Accord de Paris.

Son bilan carbone, intégrant la construction des barrages et les émissions des réservoirs, est très faible : en moyenne 24 gCO<sub>2eq</sub>/kWh (GIEC) soit 20 fois moins que le gaz et 34 fois moins que le charbon. Il est exact que certains lacs de barrage en région tropicale peuvent temporairement émettre des gaz à effet de serre (GES), par décomposition et méthanisation de la végétation dans l'eau. Celle-ci doit cependant être relativisée et peut être optimisée à la conception comme au remplissage<sup>1</sup>. Ainsi, sur le barrage de Nam Theun 2 au Laos mis en service en 2010 (1 GW, 450 km<sup>2</sup> de retenue), les émissions de GES ont-elles rapidement décliné les premières années de fonctionnement, pour atteindre un bilan global de 25 gCO<sub>2eq</sub>/kWh<sup>2</sup>.

Enfin, et nous y reviendrons, l'hydraulique apporte au monde ses capacités de stockage d'eau douce, essentielles pour traverser les sécheresses et soutenir l'étiage des cours d'eau. En France, ce sont ainsi 7 milliards de mètres cubes d'eau de surface que gère EDF Hydro pour l'ensemble des utilisateurs de l'eau, soit le plus grand stockage d'eau artificiel du pays.

Quels sont donc les risques du réchauffement climatique pour ces aménagements hydrauliques?

**Il ne pleuvra pas forcément moins, mais différemment**

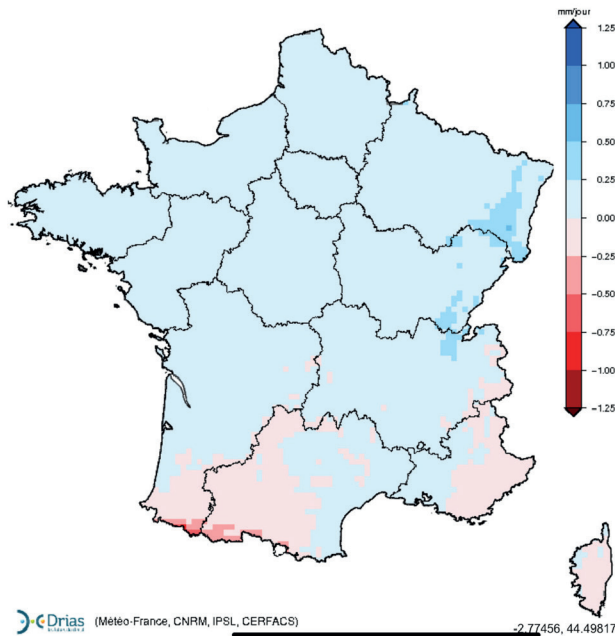
En dépit de l'opinion couramment répandue, il ne devrait globalement pas moins pleuvoir dans les décennies à venir. Presqu'au contraire pourrait-on dire : le réchauffement climatique accentue la thermodynamique à la surface du globe, et donc le cycle de l'eau. Même si les experts du climat sont très prudents, il semblerait que les précipitations globales ne soient pas affectées en moyenne annuelle, voire connaissent une légère hausse (+2 à +6 % en France continentale d'après Météo France, selon les différents scénarios du GIEC).

Selon ces mêmes experts, ces précipitations pourraient connaître en revanche une plus forte «évapotranspiration» : avec la chaleur, une partie plus importante des précipitations est directement

renvoyée à l'atmosphère, diminuant d'autant le débit des cours d'eau, en particulier sur les zones au couvert végétal plus intense, comme le sud du Massif central.

Ces précipitations seraient aussi affectées de plus grands contrastes saisonniers et régionaux (cf. Figures 1 et 2, issues du portail DRIAS «Les futurs du climat», accessible au grand public) :

- Des régions traditionnellement bien arrosées risquent de l'être encore davantage, tandis que des régions sèches risquent de connaître de vraies pénuries d'eau. Ainsi Météo France, pour la France continentale, prévoit-elle des précipitations en légère hausse pour la moitié nord et en baisse marquée sur le Sud-Ouest et la Provence.
- Des périodes de canicule et de sécheresse seront plus fréquentes et plus longues, comme nous le ressentons déjà. Sur certains scénarios apparaissent en France des vagues de chaleur



**Figure 1. Écarts de précipitations autour de 2050 en France métropolitaine, par rapport à la période de référence – Médiane, scénario sans politique climatique, horizon dit «moyen» 2041-2070**

Source : portail DRIAS, «Les futurs du climat»

Les zones en bleu devraient connaître des précipitations annuelles inchangées ou en légère augmentation, les zones en rouge une diminution.

## L'énergie hydraulique à l'heure du changement climatique

qui pourraient durer deux mois! Les étiages<sup>3</sup> des cours d'eau seront donc plus sévères dans les régions affectées. Tandis que la Seine à Paris devrait peu varier, la Loire, le Rhône ou la Garonne pourraient voir leur étiage perdre de 20 à 40 % de leur eau au cours de l'été, à Nantes, Beaucaire ou Toulouse, et ceci dès le milieu du siècle!

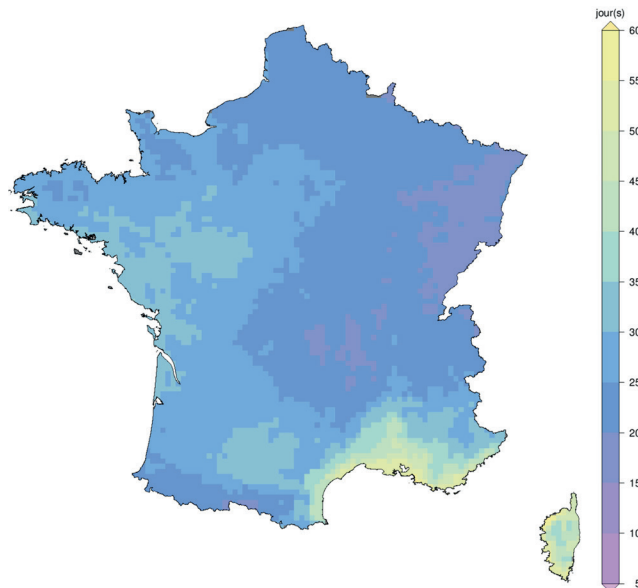
- Des hivers plus doux donneront de moindres chutes de neige, diminuant sensiblement le stock d'eau naturel que constitue le manteau nivo-glaciaire, et la fonte nivale sera plus précoce, allongeant d'autant la période d'étiage.

### L'impact devrait être limité sur la production hydroélectrique

Au total, la production hydroélectrique devrait donc être sensiblement affectée par le changement climatique, mais pas de façon si forte qu'on pourrait le craindre : d'abord parce que, nous l'avons vu, tous les ouvrages ne connaîtront pas

nécessairement une baisse des apports d'eau — sans parler de la triste hausse des débits de fonte glaciaire<sup>4</sup>. Ensuite parce que cette baisse éventuelle de la production sera progressive. Statistiquement, il est d'ailleurs très difficile de la déceler sur un signal très «bruité» par l'aléa météorologique : elle apparaît représenter un ordre de grandeur de 0,1 % par an, et pourrait atteindre selon les scénarios une dizaine de pourcents au milieu du siècle, par rapport à la fin des années 1980.

Cette baisse n'est donc pas négligeable mais doit être mesurée à l'aune de ce que connaissent déjà les hydrauliciens : d'une année sur l'autre, du seul fait des aléas météorologiques, les apports en eau annuels connaissent de forts écarts à la normale, qui peuvent aller jusqu'à plus ou moins 30 % (cf. Figure 3). Simultanément, depuis l'ouverture de marchés de gros dans les pays occidentaux, les prix moyens de l'électricité peuvent connaître eux aussi de fortes variations, de -50 % à +300 % au gré de la conjoncture dans la dernière décennie.



**Figure 2. Sécheresses : nombre maximum de jours secs consécutifs à un horizon lointain – Médiane, scénario sans politique climatique, horizon dit lointain (2071-2100)**

Source : portail DRIAS, «Les futurs du climat»

Les zones en jaune, comme le pourtour méditerranéen, pourraient connaître jusqu'à 60 jours consécutifs de sécheresse.

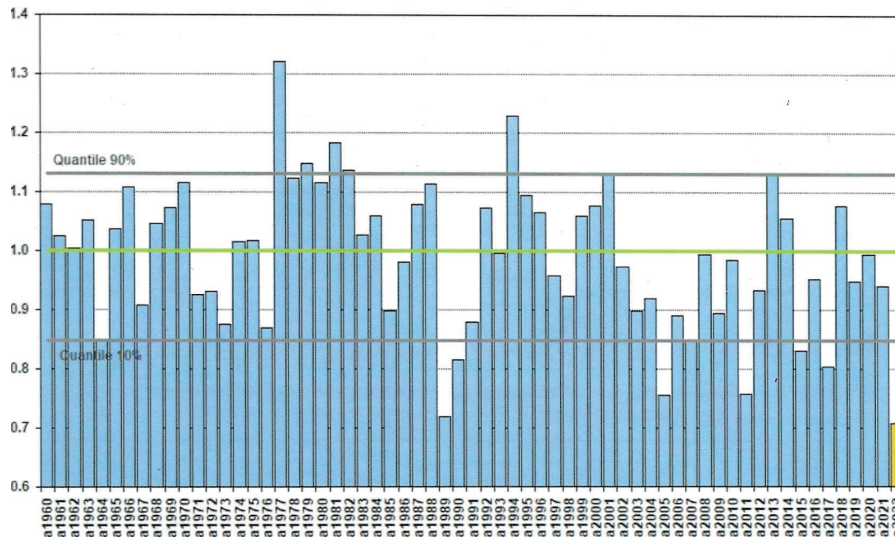
Dit autrement, le réchauffement climatique doit être intégré dans le modèle d'affaires d'une société hydroélectrique, mais il ne va pas en bouleverser l'équilibre. Notons par exemple que la réglementation des « débits réservés » en France, justifiée pour des raisons de biodiversité<sup>5</sup>, a fait perdre dans les années 2010 à EDF Hydro près de 8 % de sa production en France.

**La production de pointe, la flexibilité et le pompage-turbinage sont préservés**

Enfin, il faut bien comprendre que, à l'exception de pays très hydrauliques comme le Brésil, la Norvège ou le Canada, la valeur de l'hydraulique pour les systèmes électriques réside davantage dans sa puissance à la pointe et sa flexibilité que dans le volume d'énergie produite. Or, celles-ci dépendent de la disponibilité des ouvrages et de la gestion des stocks d'eau (les lacs de barrage) plus que des débits dans les rivières. La même année 2022 en France, marquée par une production historiquement la plus faible en énergie du

fait de la sécheresse, a ainsi connu des records de puissance lors des pointes hivernales.

De même le pompage-turbinage (STEP<sup>6</sup>), qui est aujourd'hui encore la seule solution de stockage de masse de l'électricité, n'est quasiment pas affecté par le changement climatique. Au contraire, ces ouvrages peuvent présenter un intérêt majeur dans le réchauffement, par le stockage de l'eau qu'ils permettent. Des STEP ont ainsi été construites dans des pays très secs comme Israël (Gilboa : 300 MW) ou l'émirat de Dubaï (Hatta : 250 MW). Le potentiel de développement de ces ouvrages est donc considérable sur l'ensemble de la planète, y compris dans des pays très bien équipés comme la France : plusieurs gigawatts pourraient facilement y être construits, et sans nécessairement créer de nouveaux grands barrages. Plusieurs projets de plusieurs centaines de mégawatts ont ainsi fait l'objet de communications récentes, comme celui sur la Truyère dans l'Aveyron.



**Figure 3. Coefficient de productibilité hydraulique « gravitaire » entre 1960 et 2022 (hors pompage, marémoteur... et redressé des variations du parc et conditions d'exploitation)**

Source : EDF Hydro

L'indice de productibilité mesure, ramenée à la moyenne sur la période, l'électricité qui aurait pu être produite si toute l'eau disponible était passée dans les turbines. Elle donne donc une mesure de la ressource eau disponible, indépendamment des pertes occasionnées par exemple par un arrêt pour maintenance. L'indice 1 correspond à la normale, l'indice 1,3 à un productible supérieur de 30 %, etc. On notera le caractère exceptionnel de l'année 2022.

### La gestion de l'eau : le grand enjeu de l'hydroélectricité dans le changement climatique

Si le changement climatique en soi n'a donc qu'un impact limité sur la production hydro-électrique, la gestion de l'eau dans les ouvrages hydrauliques va en revanche devenir un enjeu croissant au cours des décennies à venir sur une bonne partie de la planète.

La gestion de l'eau n'est pas une nouveauté pour les hydrauliciens : elle fait partie intégrante de leur métier, et d'ailleurs la majorité des barrages dans le monde ont été construits pour capter et stocker l'eau, ou réguler les cours d'eau, sans vocation énergétique. Même en France, de très grands aménagements hydrauliques comme celui de l'ensemble Durance-Verdon ont été conçus pour dompter les rivières et assurer l'approvisionnement en eau de la Provence, jusqu'à la fourniture d'eau potable pour 3 millions d'habitants du littoral. La gestion de l'eau est pratiquée depuis des décennies par les équipes d'EDF Hydro, pour pouvoir assurer le meilleur remplissage des lacs (sans les faire déborder), pour le passage des pointes hivernales d'électricité, mais aussi pour l'activité touristique en été ou pour l'irrigation agricole. Cela passe par 1 100 stations de mesure en France, jusqu'à celle de la neige en montagne pour prévoir les apports de la fonte au printemps. Les « lâchers d'eau » pratiqués depuis les grands lacs de barrage en été permettent de soutenir le niveau d'étiage des fleuves, comme la Garonne ou le Rhône, et donc le niveau des nappes phréatiques jusque dans les plaines. Ils permettent aussi de préserver la faune aquatique des cours d'eau en évitant leur assèchement.

Plus loin de chez nous, les grands ouvrages nord-américains sont eux-mêmes d'abord de très grands réservoirs d'eau, comme les immenses lacs artificiels du Colorado (Lake Mead et Powell, fermés par les barrages Hoover et Glen Canyon) qui ont permis l'essor de régions désertiques et la prospérité du sud de la Californie. La production d'électricité y est devenue secondaire. La baisse continue du niveau moyen de remplissage de ces lacs, décrite comme le signe de « l'agonie du

Colorado », est largement due au développement de l'activité humaine, avant le changement climatique. Elle n'est donc pas, en soi, la faute des barrages : ceux-ci ne font que mesurer ce que l'Homme veut bien en faire.

Avec le réchauffement climatique, cette gestion de l'eau va cependant devenir plus critique, plus tendue, et, osons le dire, souvent plus conflictuelle. La guerre de l'eau a déjà commencé en particulier sur des fleuves internationaux, où des barrages en amont tiennent les robinets des pays en aval. Pour en rester sur le plan intérieur, la France a une longueur d'avance pour y faire face, avec ses comités de bassin très originaux, sortes de parlements de l'eau rassemblant sous l'égide d'un président élu l'ensemble des parties prenantes, utilisateurs de l'eau, industriels ou agriculteurs, élus locaux, représentants de l'État et ONG.

Les débats sur l'utilisation de l'eau, dans l'agriculture par exemple, ou encore sur l'artificialisation des sols, dépassent le cadre de cet article. Mentionnons seulement en France l'importance de l'eau pour le refroidissement des centrales nucléaires en bord de rivière, qui fait l'objet d'un plan d'adaptation. Pour revenir à l'hydraulique, l'eau est un bien public et EDF comme les autres exploitants ne sont que les concessionnaires de sa force, répondant au mieux aux sollicitations multiples des utilisateurs, depuis les agriculteurs jusqu'aux kayakistes des rivières. Les hydrauliciens le font dans un souci de concertation et de dialogue permanent avec les acteurs du territoire, qui s'investissent de plus en plus dans ces enjeux. Il faudra aussi très probablement développer des mécanismes économiques permettant de mieux refléter la valeur de l'eau, pour sa consommation ou son énergie. Une nouvelle convention Garonne a pu ainsi être établie en 2020 entre différents acteurs, permettant de céder 36 % d'eau supplémentaire en été, en contrepartie d'un partage des coûts afférents.

Enfin, comme dans le domaine énergétique, je suis personnellement convaincu qu'il faudra créer de nouvelles infrastructures, que l'État devrait lancer dès aujourd'hui, sans attendre les crises de demain. En complément d'une sobriété et d'une

gestion rigoureuse de l'eau, de la re-naturalisation des sols, de la préservation des zones humides, etc., il serait utile de travailler sans tabou sur le transport de l'eau sur de longues distances, et son stockage sur de longues durées, comme on le fait si bien pour le pétrole ou le gaz : globalement en effet, la France ne devrait pas manquer d'eau dans le réchauffement climatique, mais elle en manquera cruellement à certains endroits et certains moments.

Au total, quelles que soient les politiques en ce domaine, se dessine un nouvel âge de l'hydraulique dans le monde, servant à la fois la demande d'eau et d'énergie.

### **La question des concessions... n'est pas étrangère à la question de l'eau**

Au chapitre de la gestion de l'eau, il ne faudrait pas passer sous silence la question lancinante et stratégique des concessions hydroélectriques européennes, et françaises en particulier. En France, ce régime juridique de 1919 n'est rien d'autre que la traduction de l'édit royal de Moulins (1566), qui énonce l'eau comme un des biens du royaume, comme l'usage de sa force. Michel de l'Hospital et Charles IX étaient des visionnaires de la gestion de l'eau. Quel étrange retournement que de voir plusieurs siècles plus tard, dans la lecture qu'en fait la Commission européenne, une vision concurrentielle et morcelée de l'exploitation hydroélectrique, forme de service marchand vendu à une « autorité adjudicatrice » pour quelques décennies, et qui pourrait être offert par de nombreux acteurs européens et même mondiaux (ces mêmes acteurs bénéficiant d'ailleurs dans leur propre pays d'origine de régimes juridiques souvent plus protecteurs<sup>7</sup>). Au contraire, l'eau qui ruisselle d'un ouvrage à un autre, qui se stocke dans un lac de montagne pour arroser et fertiliser les plaines, devrait plutôt suggérer une autre vision de ce métier, pour le faire exercer par des entreprises soucieuses du bien public et suffisamment contrôlées par l'État. Les enjeux du changement climatique, et singulièrement celui de l'eau, devraient nous inciter à la vigilance. Ce n'est pas ici le lieu de développer, et nous renvoyons le lecteur à la récente alerte faite par

la Cour des comptes dans un référé à la Première ministre de décembre 2022. À mon sens, il serait heureux : ou bien de soustraire de la directive de 2014 les concessions hydroélectriques, comme celles de l'eau potable, ou bien d'abandonner ce régime pour celui d'autorisations confiées à certaines entreprises, ou bien encore de recourir à l'exception de quasi-régie que prévoit la directive. En tout cas, ne pas céder à la délirante illusion qu'un marché concurrentiel ordinaire peut délivrer ce service sur des décennies, en se contentant de « régler » la gestion de l'eau dans un simple cahier des charges.

### **L'hydraulique est au cœur des enjeux du changement climatique : l'eau et l'énergie. Elle mérite donc d'être développée**

En conclusion, nous voyons donc que l'hydraulique, loin d'être menacée par le changement climatique, est au cœur de ses enjeux :

- En tant que première énergie renouvelable dans le monde pour la production d'électricité, elle doit non seulement être préservée mais développée, et son potentiel est encore immense à travers le monde ; les capacités existantes pourraient être doublées.
- En tant qu'énergie flexible et stockable, elle doit être développée pour accompagner l'essor des énergies renouvelables dites variables, l'éolien et le solaire. C'est particulièrement le cas des stations de pompage-turbinage, dont le potentiel de développement est également important, même en France.
- Enfin, par les infrastructures de stockage d'eau qu'elle constitue, elle représente un atout pour la gestion de l'eau, pour traverser des périodes de sécheresse plus fréquentes et plus longues, qui mériterait lui-même d'être développé avant l'apparition de crises majeures de l'eau.

Ce nouvel âge de l'hydraulique, pour servir à la fois des besoins énergétiques et des besoins en eau, n'est jamais qu'un retour aux origines mêmes des barrages et de l'aménagement des

cours d'eau, et ceci depuis des temps très anciens, parfois aux origines mêmes de la civilisation : souvenons-nous que les «Paradis perses» ou la première Jérusalem sont dotés d'étonnantes infrastructures hydrauliques, souvent souterraines, sans lesquelles ils n'auraient pu éclore.

Formulons le vœu que les États se saisissent de ces enjeux. En particulier en Europe et en France, où l'hydraulique est souvent la «belle oubliée» des énergies renouvelables. Ils peuvent compter sur les exploitants historiques, engagés pour une hydroélectricité durable, mais aussi sur des industries fortes, très bien implantées en Europe, avec de grands génies civilistes et pour ne citer qu'eux, trois champions mondiaux des turbines : Andritz, GE-Alstom et Voith. Et sur un tissu d'entreprises de taille plus modeste, souvent implantées près des vallées hydrauliques et porteuses d'emplois locaux.

Ils peuvent plus largement compter sur les hommes et les femmes de l'hydraulique, qui ont chevillés au corps le respect de l'environnement et le souci de la gestion de l'eau et de son partage. Ces hommes et ces femmes sauront répondre à ces enjeux. C'est là pour eux une formidable motivation pour un des plus beaux métiers de l'électricité.

### NOTES

1. Relativisée, car la végétation tropicale est souvent elle-même émettrice de méthane, avant la construction du barrage. Il faut donc compter la différence d'émissions, et non pas les émissions en absolu. Optimisée, par exemple en réduisant la taille de la retenue à la conception, et en procédant à sa dévégétalisation avant la mise en eau.

2. Sous le contrôle d'un panel d'experts de la Banque mondiale.

3. L'étiage d'un cours d'eau est son débit minimal de «basses eaux», mesuré statistiquement sur longue période.

4. Dans le réchauffement climatique, la fonte des glaciers apporte une hausse des débits sur les cours d'eau concernés, constatée depuis les années 2000, qui peut être localement de l'ordre de 10%. Il s'agit cependant d'une hausse transitoire sur quelques années ou décennies, et qui se tarira

avec la disparition du glacier.

5. Un barrage hydroélectrique dévie souvent l'eau de son lit naturel, dans des galeries ou conduites séparées. La réglementation issue de la directive européenne cadre sur l'eau (2000) et de la loi française sur l'Eau et les Milieux aquatiques (2006) oblige à réserver le décile du débit de la rivière dans son lit naturel, pour y maintenir la faune piscicole, diminuant mécaniquement le volume d'eau turbiné. L'adjonction de turbines dites de «débit réservé» permet de compenser en partie cette perte.

6. Station de Transfert d'Énergie par Pompage (*Pumped Hydro*) : l'eau est pompée depuis un barrage bas vers un barrage haut, pour y être stockée. Cette eau sera turbinée dans le sens inverse pendant les heures de pointe. Une STEP est ainsi une forme de batterie géante, stockant l'électricité sous forme d'eau. Les grandes STEP, comme celle de Grand'Maison près de Grenoble, peuvent représenter l'équivalent de la puissance d'un ou deux réacteurs nucléaires.

7. La variété des régimes juridiques d'exploitation hydroélectriques et des droits de propriété des barrages est considérable en Europe et dans le monde, depuis de simples autorisations jusqu'au régime de concession. La variété de l'économie des ouvrages est elle-même considérable, entre des barrages sur de grands fleuves par exemple, ou des ouvrages plus modestes. Les opérateurs historiques risquent donc de perdre en concurrence les ouvrages les plus rentables, et de continuer à supporter les coûts de ceux qui le sont moins, ou qui délivrent des services de gestion de l'eau non marchands. Enfin, sur une même vallée, un barrage dit «de tête» en montagne peut présenter des coûts élevés pour une faible production d'électricité, tandis que les ouvrages en aval bénéficieront de sa fonction de stockage.

### BIOGRAPHIE

**YVES GIRAUD** est diplômé de l'École Polytechnique et des Mines de Paris. Il effectue toute sa carrière à EDF, d'abord comme ingénieur nucléaire puis alternant des postes managériaux et stratégiques. Il participe simultanément à l'enseignement de l'économie aux Mines de Paris. Il est notamment directeur EDF GDF Services dans les Hauts-de-France, directeur commercial régional en Île-de-France (5 M de clients) où il conduit l'ouverture à la concurrence de 2007. En 2009, il est directeur de l'Économie et de la Stratégie de la production d'EDF, puis directeur d'EDF Hydro de 2015 à 2022.