



InterSections

Promesses et réalités des énergies renouvelables

Bernard Wiesenfeld

edp sciences

Extrait de la publication

Promesses et réalités des énergies renouvelables

Bernard Wiesenfeld

Illustration de couverture :
La Grande Vague de Kanagawa.

Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-0622-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2013

Sommaire

Avant-propos	5
Introduction : L'électricité, une énergie singulière	9
Partie 1 L'énergie hydraulique	17
Chapitre 1 • Les aménagements hydroélectriques actuels.....	19
Les différents types d'aménagements	19
Aménagement de type « centrale de lac »	23
Avantages de l'énergie hydraulique	29
Hydraulique et environnement.....	30
Chapitre 2 • L'énergie hydroélectrique en Europe.....	33
La grande hydraulique française en chiffres.....	33
La petite hydraulique en Europe.....	35
Chapitre 3 • Projets d'énergies renouvelables marines à moyen et long termes (au-delà de 2020).....	37
L'énergie du vent	37

L'énergie des courants de marées.....	38
L'énergie des courants marins	42
L'énergie de la houle	44
L'énergie thermique des mers.....	46
L'énergie osmotique du gradient de salinité	48
Conclusion.....	49
Partie 2 L'éolien	51
Chapitre 4 • D'où vient le vent ?	53
Définition	53
Direction du vent	55
Vitesse du vent	57
Qu'est-ce qu'un cyclone ?	58
La carte des vents et le potentiel éolien	59
Chapitre 5 • Démarrage de l'éolien.....	61
Des débuts difficiles	61
Extension à l'océan.....	63
Problème de l'intermittence.....	65
Les petites éoliennes	66
L'éolien et ses détracteurs.....	66
Chapitre 6 • Comment fonctionne une éolienne ?.....	69
Composantes d'une éolienne à axe horizontal.....	70
Puissance produite par une éolienne	72
Systèmes de régulation dynamique	73
Production d'énergie électrique	75
Les fabricants d'éoliennes	76
Synthèse des avantages et des inconvénients de l'éolien.....	77
Stockage de l'énergie d'une éolienne.....	78
Le potentiel éolien.....	79
Chapitre 7 • État des lieux en Europe.....	81
Bilan technique	81
Bilan socio-économique	83
Les éoliennes dans le monde.....	85
Partie 3 L'énergie solaire	87
Chapitre 8 • Soleil et énergie	89
Distribution du rayonnement solaire sur la Terre.....	89
Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.....	93

Chapitre 9 • L'électricité solaire photovoltaïque	95
La conversion photovoltaïque.....	95
Principe de la photopile.....	96
Fonctionnement de la photopile.....	96
Les différentes filières photovoltaïques.....	98
L'énergie photovoltaïque en Europe.....	100
Les fabricants de cellules photovoltaïques	103
Perspectives 2020 dans l'Union Européenne.....	104
Chapitre 10 • Les centrales thermiques solaires.....	105
La centrale à capteurs cylindro-paraboliques.....	107
La centrale à tour.....	108
La centrale solaire à capteurs paraboliques	109
La centrale solaire à effet de cheminée	110
La centrale à réflecteurs de Fresnel.....	111
Bilan	113
Partie 4 Les autres énergies renouvelables	115
Chapitre 11 • La biomasse.....	117
Les végétaux	118
Les déchets organiques	119
Chapitre 12 • La géothermie	125
Origine de la chaleur terrestre.....	125
La production d'électricité par la géothermie.....	126
Les sites géothermiques	127
Conclusions pour la France	129
Partie 5 Les énergies renouvelables dans le contexte actuel.....	133
Chapitre 13 • Les énergies renouvelables et le développement durable.....	135
Le développement durable.....	136
Chapitre 14 • Les autres énergies primaires : l'énergie fossile et l'énergie nucléaire.....	153
Énergie fossile.....	154
L'énergie nucléaire	157
Conclusion	161
Glossaire	167
Sigles et symboles	171

Vj ku'r ci g'kpvgpvkqpcmf 'ighv'dnc pm

Avant-propos

La nécessité nous délivre de l'embaras du choix.

Le marquis de Vauvenargues

À l'origine, l'Homme n'avait à sa disposition en termes d'énergie que le feu (maîtrisé 400 000 ans avant J.-C.) et sa propre force physique, puis celle de l'animal lorsqu'il se sédentarisa au Néolithique. Ensuite, et jusqu'à une période très récente, il y ajouta des énergies que l'on appelle aujourd'hui « renouvelables », pour l'aider dans ses activités quotidiennes (le vent pour se déplacer sur les mers (embarcation à voile) ou pour moudre le grain (moulin à vent), le soleil, par exemple pour chauffer une habitation ou pour sécher les vêtements une fois lavés, l'eau dans la conception de pilons et de soufflets de forges hydrauliques...).

Les magnifiques enluminures du livre des *Très Riches Heures du duc de Berry* (début du XV^e siècle), représentant chaque mois de l'année par une scène caractéristique, sont une parfaite illustration du mode de vie moyenâgeux et de sa lente évolution temporelle. On y observe notamment le remplacement dans les campagnes du bœuf par le cheval de trait afin d'augmenter les performances agricoles.

La révolution industrielle vint bouleverser cet ordre établi il y a un peu plus de deux siècles dans les pays d'Europe occidentale. On commença à utiliser des énergies commerciales pour substituer la machine à la force animale ou humaine. Ce fut également la révolution énergétique qui vit l'éclosion de trois différentes énergies en l'espace de seulement 150 ans afin de répondre à des besoins sans cesse renouvelés. Ces énergies furent d'abord le charbon, puis les hydrocarbures et enfin le nucléaire.

Il en résulta une élévation de la qualité de la vie, notamment dans les secteurs du transport et du confort domestique. Cette transformation économique profonde fut longtemps limitée à l'Europe occidentale (elle naquit en Angleterre au siècle des Lumières), puis à l'Amérique du Nord et au Japon au XX^e siècle, avant de se propager dans les pays émergents (Brésil, Russie, Inde, Chine).

On peut décliner la chronologie d'apparition de ces énergies en trois étapes :

- l'invention de la machine à vapeur fut déterminante dans l'exploitation minière du charbon qui, au siècle des Lumières, fut la seule énergie susceptible de fournir la chaleur nécessaire à la production de vapeur ;
- un siècle plus tard, les premiers puits de pétrole exploités par la Standard Oil Company, fondée par W. Rockefeller en 1870 virent le jour et marquèrent le début du développement des industries utilisant les produits obtenus par distillation du pétrole : goudrons, lubrifiants, naphtha, solvants et essences ;
- enfin, au sortir de la deuxième guerre mondiale naquit l'industrie nucléaire civile qui avait l'avantage d'extraire de la matière une énorme quantité d'énergie, mais l'inconvénient de produire des substances radioactives.

Pour de nombreux pays, dont la France, c'est véritablement la première crise pétrolière de 1973, au cours de laquelle le prix du baril de pétrole quadrupla subitement, qui marqua une accélération significative des programmes nucléaires, afin de sortir de la dépendance énergétique aux pays exportateurs de pétrole.

On chercha également à économiser l'énergie et à développer les énergies renouvelables qui faisaient figures de solutions alternatives.

Aujourd'hui, l'ensemble des énergies dont nous disposons – le charbon, les hydrocarbures (pétrole et gaz), le nucléaire et les énergies renouvelables (hydraulique, éolien, solaire, géothermique et biomasse) – constituent les composantes du mix énergétique dont la composition varie d'un pays à l'autre.

En effet, chaque pays a sa politique énergétique propre, en fonction de ses ressources internes, mais également de ses sensibilités politiques : l'Allemagne et la Chine sont charbonnières, la Norvège et la Suède sont hydrauliques, la France et la Finlande sont nucléaires...

En 1997, 159 pays se réunirent à Kyoto afin d'adopter un protocole international dont l'objectif était de lutter efficacement contre le réchauffement climatique.

Les exigences très contraignantes de ce protocole en matière d'émission de gaz à effet de serre justifiaient des mesures drastiques visant à limiter le recours aux énergies fossiles.

En outre, des organisations hostiles au nucléaire sensibilisèrent l'opinion publique aux risques inhérents à cette industrie, notamment à la suite de l'accident de Fukushima en 2011.

En conséquence, en se focalisant sur la production d'électricité, carrefour de toutes les énergies, la question est de savoir quel rôle on doit allouer aux énergies renouvelables au sein du mix énergétique, afin de satisfaire la demande d'électricité tout en garantissant un prix de revient raisonnable dans des conditions de fiabilité et de sécurité acceptables.

L'objectif principal de cet ouvrage est de tenter de répondre à cette question.

Vj ku'r ci g'kpvgpvkqpcmf 'ighv'dnc pm

Introduction

L'électricité, une énergie singulière

Le système énergétique est l'ensemble des opérations effectuées sur l'énergie, depuis sa source d'approvisionnement jusqu'à son utilisation par l'Homme.

Il s'est complexifié avec le développement technologique et, en partant de la source, il convient de distinguer trois niveaux d'énergies : les énergies primaires, les énergies secondaires et les énergies finales.

Trois niveaux d'énergies

Énergies primaires

C'est le premier niveau du système énergétique, qui se compose de toutes les sources disponibles dans la nature. On en distingue deux catégories, les énergies primaires non renouvelables et les énergies primaires renouvelables :

- les énergies primaires non renouvelables sont les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) et le combustible nucléaire (uranium et thorium pour la fission, deutérium et tritium pour la fusion) ;
- les énergies primaires renouvelables sont l'hydraulique, l'éolien, le solaire, la biomasse et la géothermie.

L'énergie non renouvelable se présente sous la forme d'une énergie stockée (c'est-à-dire comparable, en mécanique, à l'énergie potentielle), chimique pour les combustibles fossiles et nucléaire pour le combustible fissile.

Les énergies renouvelables peuvent être de forme libre (c'est-à-dire comparable, en mécanique, à l'énergie cinétique) ou stockée :

- énergie libre : l'éolien a pour origine des mouvements météorologiques provoqués par le rayonnement solaire. L'énergie solaire provient, à l'évidence, du rayonnement solaire ayant pour origine la fusion nucléaire dans le soleil. Enfin, l'énergie marémotrice, d'origine hydraulique, est une énergie mécanique qui émane de la force d'attraction gravitationnelle de la lune (et du soleil dans une moindre mesure) ;
- énergie stockée : hydraulique (énergie potentielle qui stocke le rayonnement solaire), géothermie (énergie d'origine nucléaire puisque découlant principalement de la chaleur dégagée par la radioactivité de l'uranium, du thorium et du potassium présents dans le manteau et la croûte terrestre) et biomasse (issue du processus de photosynthèse pour les végétaux et de réactions organiques pour les déchets).

L'énergie fossile (charbon, pétrole, gaz), d'origine organique, provient de l'énergie de fusion nucléaire dans le soleil.

Il en est de même de la plupart des énergies renouvelables (biomasse, solaire, hydraulique, éolien).

L'énergie nucléaire a pour origine la fission de l'uranium ou du thorium, ou encore la fusion du deutérium et du tritium, et la géothermie provient, comme nous venons de le voir, de la radioactivité émise dans les entrailles de la terre.

En définitive, hormis l'énergie marémotrice, dont la contribution au bilan énergétique est marginale, toutes les sources d'énergies disponibles dans la nature ont pour origine des réactions nucléaires de type fusion, fission ou radioactivité.

Énergies secondaires (ou vecteurs énergétiques)

Les énergies primaires doivent subir des transformations pour être transportées puis consommées. Les énergies secondaires sont le résultat de ces transformations.

Il s'agit principalement :

- des produits pétroliers, issus du raffinage du pétrole brut : kérosène, essence, gasoil, fuel domestique ;
- de l'électricité produite dans les centrales thermiques (combustible fossile) ou nucléaire (combustible fissile) et dans les installations utilisant une énergie renouvelable ;
- de la vapeur, provenant généralement de la conversion d'énergies renouvelables (biomasse, solaire, géothermie), utilisée par exemple pour des opérations de séchage industriel ;

- de l'hydrogène produit par craquage thermique ou par électrolyse de l'eau, ou encore par reformatage du gaz naturel (méthane). Ce vecteur énergétique pourra, à l'horizon 2050, fournir de l'électricité dans des piles à combustible utilisables pour la propulsion des voitures ou dans des centrales de production électrique.

Énergies finales

En aval du système énergétique se situent les besoins élémentaires en énergie de l'activité humaine que l'on classe par secteurs d'utilisation de l'énergie.

On distingue trois grands secteurs d'utilisation de l'énergie :

- la consommation domestique (chauffage, confort domestique) ;
- les transports ;
- l'industrie.

Les quatre énergies libres (thermique, mécanique, rayonnement, électricité) peuvent se décliner dans ces différents secteurs de la façon suivante :

- énergie thermique : il s'agit du chauffage et de la réfrigération. Les besoins se situent dans les locaux d'habitation et de travail, ainsi que dans les processus industriels d'élaboration de matériaux divers (métaux, briques, ciment...) ;
- énergie mécanique (cinétique) : des applications multiples existent dans les transports (voiture, train, avion), l'industrie (moteur, pompe, compresseur...) et le secteur résidentiel (appareils ménagers, ascenseur...) ;
- rayonnement : il est utilisé dans l'éclairage, les télécommunications, la télévision, l'imagerie médicale...
- la quatrième énergie libre, l'électricité, est particulière dans la mesure où elle est à la fois une énergie primaire et un vecteur énergétique. On la retrouve dans tous les secteurs d'utilisation de l'énergie.

C'est au niveau final du système énergétique que l'on mesure toute l'importance de l'énergie dans l'activité économique.

Spécificités de l'électricité

Parmi les différents vecteurs énergétiques, l'électricité est le plus important pour l'activité humaine si bien que l'on peut mesurer le degré de développement économique d'un pays à la contribution de l'électricité à ses besoins énergétiques.

Cette contribution est aujourd'hui de 20 % en moyenne sur la planète, mais de 40 % dans les pays industrialisés. Son taux de pénétration est de 5 à 10 % par an dans certains pays en développement alors qu'il n'est que de 1,5 % par an dans les pays de l'Union européenne. Cela signifie que le recours à l'énergie électrique témoigne de la volonté d'un pays de s'industrialiser. L'électricité est également le principal besoin en énergie des économies émergentes.

Les raisons de cette prépondérance sont multiples.

L'énergie électrique est en premier lieu le carrefour des énergies car elle peut être produite, en tant que vecteur énergétique, à partir de toutes les énergies primaires. Cela peut notamment s'effectuer sans pollution atmosphérique à partir d'un combustible nucléaire ou d'une énergie renouvelable.

En outre, l'électricité a la faculté de satisfaire, à tout moment et en tout lieu, de multiples besoins énergétiques grâce à un réseau de distribution fiable et dense (voir « Transport et Distribution de l'électricité », ci-après).

Enfin, un appareillage électrique est généralement d'un usage simple et rapide.

En revanche, l'électricité possède l'inconvénient majeur de ne pas être stockable, si ce n'est en quantités faibles et à un coût élevé, sous forme d'énergie chimique dans des piles ou des batteries d'accumulateurs. C'est notamment la faible autonomie de ces systèmes de stockage de l'électricité qui retarde sa pénétration dans le domaine du transport (par exemple, la voiture électrique).

On développe également d'autres technologies de stockage sous forme d'air comprimé, d'énergie thermique ou d'hydrogène produit par électrolyse de l'eau.

Le moyen de loin le plus efficace pour stocker l'électricité consiste à procéder indirectement en faisant remonter l'eau d'une rivière ou d'une retenue vers un réservoir situé en amont à l'aide d'un système de pompage. L'énergie potentielle accumulée est libérée par gravité et l'énergie cinétique produite est convertie en électricité dans une turbine à eau couplée à un alternateur.

Transport et distribution de l'électricité

L'énergie primaire, une fois convertie en énergie secondaire, doit être acheminée jusqu'à l'utilisateur final. Cette mission s'effectue en deux étapes : il s'agit d'abord de transporter massivement l'énergie des centres de production vers les régions consommatrices, puis de distribuer localement l'énergie vers les utilisateurs.

Dans la mesure du possible, on transporte et on distribue l'électricité à l'aide de réseaux. Par analogie avec le réseau routier, le réseau de transport correspond au réseau autoroutier et le réseau de distribution au réseau de routes départementales.

Afin de limiter les pertes en lignes par effet Joule, le transport d'électricité s'effectue à très haute tension, alors que la distribution est assurée à basse tension. On peut ainsi découper le réseau électrique français en fonction du niveau de tension électrique :

- le réseau de transport (380 000 volts) recouvre toutes les régions de France grâce à un maillage suffisamment fin et traverse en une dizaine de points nos frontières afin de s'interconnecter aux réseaux des pays limitrophes. Il achemine de grandes quantités d'électricité des centrales de production vers les régions consommatrices ;

- les réseaux de répartition (60 000 volts) sont un sous-ensemble du réseau de transport et desservent des zones de consommation dans un découpage plus fin ;
- les réseaux de distribution (15 000 volts) assurent l’approvisionnement des clients finals (220 V alternatif monophasé et 380 V alternatif triphasé).

Les réseaux sont reliés deux à deux par des stations de transformateurs électriques permettant de passer d’une tension donnée à la tension inférieure suivante.

La figure 1 schématise le réseau électrique français depuis le transformateur de la centrale de production électrique donnant un courant de 380 000 V triphasé jusqu’au transformateur du réseau de distribution vers le consommateur permettant le fonctionnement de moteurs électriques en 380 V triphasé ou encore l’éclairage en 220 V standard monophasé.

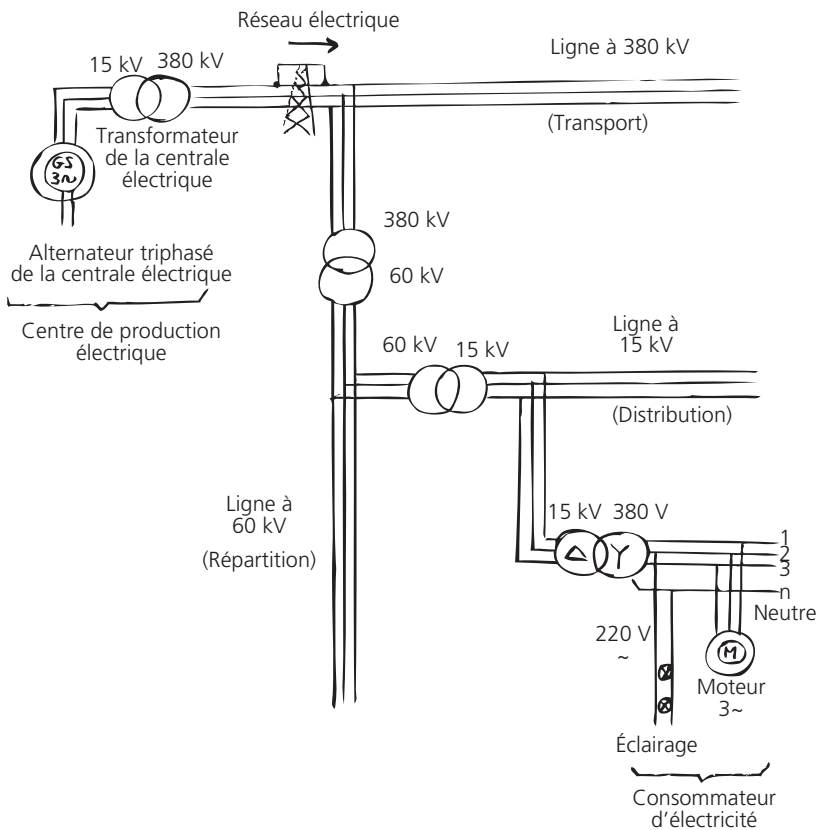


Figure 1 *Transport et distribution de l'électricité en France.*

Modes de production de l'électricité

Les principaux moyens de production de l'électricité sont :

- l'énergie fossile :
 - le charbon ;
 - les hydrocarbures (pétrole, gaz) ;
- l'énergie nucléaire :
 - fission :
 - l'uranium,
 - le plutonium,
 - le thorium ;
 - fusion :
 - le deutérium et le tritium ;
- les énergies renouvelables :
 - l'hydraulique ;
 - le solaire ;
 - l'éolien ;
 - la biomasse ;
 - la géothermie ;
- l'hydrogène (pile à combustible).

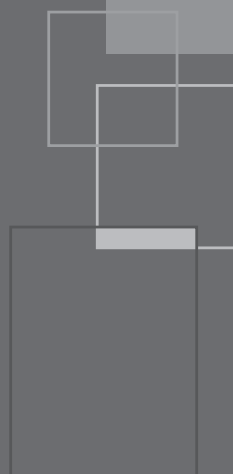
L'objet de cet ouvrage est de développer les modes de production de l'électricité à partir des énergies renouvelables.

Nous ne traiterons donc pas de l'hydrogène qui, bien que « renouvelable », n'est pas une énergie primaire mais un vecteur énergétique.

Partie

1

L'énergie
hydraulique



L'usage de l'énergie hydraulique remonte à l'Antiquité, bien avant l'avènement de l'électricité.

Les premiers moulins à eau apparaissent d'abord en Perse puis les Romains les utilisent principalement pour mouler le grain et fabriquer l'huile d'olive.

En Chine, la dynastie des Han (à partir du II^e siècle avant l'ère chrétienne) introduisit les pilons et les soufflets de forge hydrauliques. Ces usages s'étendirent encore au fil des siècles.

À la fin du premier millénaire, on rencontre des scies hydrauliques d'origine byzantine coupant le marbre à Gerasa en Jordanie.

L'énergie hydraulique jouissant, par rapport à la force animale ou humaine, d'un rendement nettement supérieur, elle contribue *de facto* au recul de l'esclavage : chaque meule d'un moulin à eau peut mouler 150 kg de blé par heure, ce qui équivaut au travail d'une quarantaine d'individus.

Au XIX^e siècle, l'énergie hydraulique contribue au développement industriel en Europe et aux États-Unis. Les applications sont multiples, notamment dans les mines, les forges et l'industrie textile. La filature de Lowell (Massachusetts, États-Unis) emploie plus de 7 000 personnes dans les années 1840 et exploite quelque 80 roues hydrauliques. Dans ce même siècle, l'ingénieur français Benoît Fourneyron invente la turbine hydraulique centrifuge et imagine des ouvrages d'aménée d'eau sous pression. L'ancêtre des turbines à eau est né. Avec l'invention de l'alternateur (vers 1880) et du transformateur (quelques décennies plus tôt), il devient alors possible de transporter l'électricité vers les lieux de consommation, pour l'éclairage des villes ou pour les besoins de l'industrie.

En France, l'électrochimie et l'électrometallurgie s'installent dans les vallées des Alpes et des Pyrénées.

La turbine à eau est adoptée simultanément aux États-Unis et en Europe : le turboalternateur des chutes du Niagara fournit 11 MWe dès 1895. L'électricité alimente alors les tramways, les usines électrochimiques et l'éclairage des villes alentours, remplaçant progressivement le gaz.

Cette croissance se poursuit au XX^e siècle par l'aménagement de certains fleuves : le Rhin (sur lequel on construit 16 barrages abritant autant de centrales hydroélectriques, entre 1912 et 1977), le Rhône (début de la construction du 1^{er} barrage à Génissiat en 1937)... En parallèle, on régule les cours d'eau en utilisant des réservoirs naturels (lac d'Orlu, 1904) ou en créant des réservoirs artificiels derrière des barrages.

Les aménagements hydroélectriques actuels

Les différents types d'aménagements

L'hydroélectricité est l'électricité produite par l'énergie hydraulique d'un cours d'eau ou d'un réservoir en exploitant l'énergie potentielle de gravité emmagasinée dans l'eau.

Cette forme d'énergie est renouvelable puisque le cycle de l'eau provoqué par la chaleur du soleil (évaporation de l'eau de mer et condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère) régénère les cours d'eau terrestres.

Elle assure au pays qui en est doté une garantie d'approvisionnement à long terme, bien que limité à court terme par d'éventuelles périodes de sécheresse.

En 2006, l'hydroélectricité représentait 15 % de la production d'électricité mondiale (en comparaison, la part du nucléaire était de 15 % et celle de l'énergie fossile de 67 %). C'est de loin l'énergie renouvelable la plus utilisée dans le monde pour la production électrique puisque l'ensemble des autres énergies renouvelables représentent une part d'environ 3 %.

La plupart des pays développés utilisent déjà une majeure partie de leur potentiel hydroélectrique alors que des ressources non exploitées sont encore abondantes dans nombre de pays en développement.