



Hydraulique et géothermie : principes physiques et modalités d'utilisation

Hydraulique

L'électricité d'origine hydraulique provient de la captation, avec un rendement d'environ 85 %, de la variation d'énergie potentielle de l'eau entre deux niveaux : en pratique il faut une tonne d'eau qui descend d'environ 400 m pour produire 1 kWh.

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivée dans les prises d'eau constitue une énergie potentielle utilisée pour actionner la roue d'une turbine. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique. Cette turbine, à son tour, entraîne un alternateur grâce auquel l'énergie mécanique va devenir énergie électrique. Deux facteurs influencent directement la puissance disponible : la hauteur de la chute (H) et le débit (Q).

Cette relation peut s'écrire : $P = k.H.Q$.

Le coefficient k tient compte du poids spécifique de l'eau et des rendements des différentes machines.

Pour une même puissance, une turbine peut donc 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.

Par ailleurs, les aménagements peuvent ou non comporter une réserve d'eau, ce qui permettra de produire de l'électricité dans les meilleures conditions économiques. Cette réserve d'eau peut-être naturelle ou, le plus souvent, artificielle.

Les deux caractéristiques étant souvent liées en pratique (les hautes chutes nécessitent impliquent souvent la faculté de constituer une réserve abondante, surtout en regard du débit qui est faible), il est possible d'établir une classification schématique des différents types d'aménagements hydrauliques.

Les divers types d'aménagements hydroélectriques

Chaque site possède des caractéristiques géographiques, géologiques, topographiques, hydrologiques qui lui sont propres. C'est pourquoi les aménagements hydroélectriques présentent une telle diversité.

Toutefois, il est possible de déterminer 4 grands types d'aménagements répondant aussi chacun à une fonction spécifique dans l'organisation générale de la production d'électricité.

Les centrales au fil de l'eau (barrages de basse chute)

Ces centrales turbinent en permanence l'eau qui coule dans des cours d'eau caractérisés par une faible pente et un fort débit. Elles n'ont pas de réserve disponible, leur capacité de retenue n'excédant pas deux heures. Les barrages sont équipés de vannes importantes pour le passage des crues, d'où leur nom de « barrages mobiles ». Ces centrales fournissent de l'électricité en base, et ne jouent aucun rôle dans l'ajustement de l'offre avec la demande.

En France, la puissance cumulée de ces centrales représentait, en 1998, 7461 MW. Elles ont permis la production de 37,3 TWh.

Les centrales d'écluse (barrages de moyenne chute)

Ces équipements sont généralement situés en moyenne montagne, sur des cours d'eau à pente moyenne et à débit abondant, dans des régions à relief adouci (Jura, Massif Central). Ils possèdent des réserves d'eau qui peuvent être utilisées sur de courtes périodes (2 à 400 heures). De ce fait, on réduit ou on arrête leur production pendant les heures les moins chargées de la journée ou de la semaine. En revanche, pendant les heures de forte demande, on les utilise à leur puissance maximale, ce qui entraîne la vidange de la réserve (c'est le fonctionnement en écluse).

En France, la puissance cumulée de ces centrales représentait, en 1998, 4306 MW. Elles ont permis la production de 13,9 TWh.

Les centrales de lac (barrage de haute chute)

Elles sont le plus souvent situées en altitude, dans les sites de montagne. Elles bénéficient, pour des débits parfois faibles, de très importantes dénivelées. Elles disposent de grandes retenues d'eau qui se remplissent par les précipitations tombées sur le bassin versant amont, la fonte des neiges jouant un rôle essentiel. Ces réserves autorisent une durée de fonctionnement à pleine puissance supérieure à 400 heures par an. Ces équipements ont donc une importante fonction saisonnière car ils disposent d'une capacité suffisante pour stocker des apports en eau du printemps et les restituer l'hiver suivant (spécialement en période de pointe) au moment où la demande d'énergie électrique est la plus forte. De plus, elles sont capables d'augmenter très rapidement leur production et sont sollicitées pour pallier les indisponibilités éventuelles des autres centrales.

En France, la puissance cumulée de ces centrales représentait, en 1998, 9265 MW. Elles ont permis la production de 17,4 TWh.

Les stations de transfert d'énergie par pompage (S.T.E.P.)

Leur principe de fonctionnement est fondé sur la circulation de l'eau entre deux réservoirs, reliés par des conduites et comportant des pompes et des turbines.

Pendant les périodes de faible consommation d'eau, lorsque le kWh est le moins cher, la centrale consomme de l'électricité pour refouler par pompage, l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur. Pendant les périodes de forte consommation, l'eau accumulée dans le réservoir supérieur du bassin supérieur est relâchée vers le bassin inférieur et turbinée pour produire de l'électricité. Si quelques apports d'eau gratuits se font au réservoir supérieur, du fait des précipitations on parle de pompage mixte. Dans le cas contraire, c'est du pompage pur. Le rendement est de l'ordre de 70 %.

Comme les centrales de lac, les STEP constituent une réserve de puissance facile à mobiliser et susceptible d'intervenir très rapidement lors d'incidents sur le réseau.

En France, la puissance cumulée des STEP de pompage mixte représentait, en 1998, 2445 MW qui ont permis la production de 1,16 TWh (il s'agit de l'énergie récupérée sur les apports gratuits au réservoir supérieur). Par ailleurs, les STEP de pompage pur représentaient, en 1998, 1858 MW. Par définition même, elles n'ont rien produit. L'ensemble des STEP a permis également de consommer 5,5 TWh d'heures creuses pour les transformer en 3,9 TWh d'heures pleines.

Quelques éléments techniques.

Les différents types de barrages.

Il s'agit de retenir en toute sécurité une énorme masse d'eau pour la turbiner quand cela est nécessaire. Le barrage doit tout d'abord résister à la poussée des plusieurs millions de m³ d'eau. La poussée dépend de la hauteur d'eau mais pas de la longueur de la retenue ni du volume d'eau. Par contre, la pression varie sur toute la hauteur du barrage. On peut établir une classification à plusieurs niveaux :

- **Les barrages mobiles** : lorsqu'un barrage se trouve à proximité de terres cultivées, d'agglomération ou de voies de communication, ce qui est souvent le cas en plaine, il est indispensable d'éviter une élévation trop importante en amont. Les barrages mobiles comportent donc des vannes servant à évacuer l'eau dès que nécessaire.
- **Les barrages fixes** : on y distingue encore deux sous catégories :
 - **Les barrages massifs** : ce sont des barrages monolithiques de béton qui s'opposent aux forces créées par la pression de l'eau soit par leur propre poids (barrages poids), soit en reportant la poussée hydraulique sur les rives par un effet de voûte (barrages voûtes), soit en reportant les efforts sur le sol par l'intermédiaire de contreforts (barrages contreforts).
 - **Les barrages poids** : caractérisés par une section pratiquement triangulaire (du côté de l'eau la paroi est généralement verticale alors que son parement aval, incliné, assure sa stabilité) ils présentent l'avantage de ne solliciter que très peu la résistance des berges. Toutefois leur construction requiert une grande quantité de béton. poids oppose sa masse à la pression de l'eau.
 - **Le barrage voûte** qui est basé sur un principe identique à celui des voûtes des cathédrales romanes. Il reporte sur les rives la poussée hydraulique. Le côté convexe du fin voile de béton est dirigée vers la retenue d'eau. A la base du barrage, où la pression est plus élevée, l'arc de cercle possède un petit rayon de courbure et le barrage est plus épais. En prenant de la hauteur, l'arc s'affirme et s'élargit. Ce type de barrage est réservé aux sites étroits constitués de parois géologiquement saines qui peuvent supporter les efforts transmis par le béton. Dans le cas de vallées plus larges, il est possible d'associer une voûte à un barrage à contreforts.
 - **Les barrages à contreforts**. Les contreforts en béton, de forme triangulaire, supportent des voûtes de faible portée. Toute la poussée de l'eau est reportée sur le sol. L'essentiel du poids du barrage est ainsi réduit aux contreforts, ce qui permet de diminuer le volume du béton mis en œuvre.
 - **Les barrages en matériaux non liés (remblais)** : ils sont réalisés par l'empilement de matériaux juxtaposés sans élément de liaison particulier. Ils comportent néanmoins un élément assurant leur étanchéité. Ces ouvrages ne peuvent pas subir d'effort de traction.

Les différents types de turbines

La turbine va permettre de transformer l'eau qui s'échappe de la conduite en énergie de rotation. La forme et les caractéristiques des turbines dépendent des catégories d'installations hydroélectriques dans lesquelles elles sont employées :

La turbine Pelton, généralement réservée aux usines de haute chute (de 300 à 1800 mètres), a été mis au point par Pelton au XIXe siècle. Cette turbine est constituée d'une roue, sur la périphérie de laquelle sont fixés des séries de cuillères doubles métalliques appelées augets. L'eau sort de la conduite forcée à grande vitesse et vient percuter avec force les augets de la roue par l'intermédiaire des injecteurs. La puissance maximale atteinte est de 400 MW.

La turbine Francis est utilisée pour les moyennes chutes (entre 30 et 750 mètres). Elle ressemble à un cylindre évasé, divisé sur sa longueur par une série de cloisons longitudinales incurvées. Le pourtour élargi de la turbine est cerclé par une couronne percée d'une vingtaine d'ouvertures par lesquelles se déverse l'eau sous pression venant de la conduite forcée. Cette eau glisse sur les pales de la turbine et se dirige vers son cœur, d'où elle est évacuée. Lorsque l'eau s'écoule par les canaux de la turbine, elle abandonne sa pression aux pales de la turbine. C'est cette différence de pression qui est à l'origine de rotation de la turbine. La puissance maximale atteinte est de 800 MW.

La turbine Kaplan sert dans les usines de basse chute (10 à 80 m) . L'eau est canalisée par des puits en béton de cinq à dix mètres de diamètres vers une chambre dont le tracé en colimaçon permet à l'eau d'arriver sur la turbine avec la meilleure efficacité. Les turbines Kaplan ont une forme d'hélices de navire. Leurs pales sont orientables et permettent, par simple variation de leur inclinaison, d'ajuster la vitesse de rotation des turbines aux conditions de niveau. La puissance maximale atteinte est de 200 MW. Une variante des turbines Kaplan est celle des « groupes bulbes », pour les très basses chutes (5 à 20 m) dont la technique a été développée en France pour l'usine marémotrice de la Rance. L'alternateur est accolé à la turbine. Grâce à un système de protection étanche, ces groupes peuvent être complètement immergés dans l'eau. La puissance maximale atteinte est de 60 MW.

Pour les STEP, on emploie soit des groupes ternaires (dont la ligne d'arbre comporte la turbine, l'alternateur et la pompe) soit des groupes avec pompes-turbines réversibles capables d'assurer turbinage et pompage.

La place de l'énergie hydraulique

Données économiques

D'une manière générale, les centrales hydroélectriques sont chères en investissement (10 000 F par kW - c'est à dire environ trois fois plus qu'un cycle combiné à gaz - est un ordre de grandeur très approximatif) mais peu coûteuses en fonctionnement. Mais contrairement aux autres types de centrales électriques, assez standardisées, chaque centrale hydroélectrique est un cas particulier, ne serait-ce par la spécificité des services qu'elle peut rendre (production à des périodes plus ou moins chargées, rôle de réserve en cas de défaillance d'autres unités, capacité à suivre les variations de la demande). Un paramètre important est la durée de production qu'elle a en réserve (taille du réservoir). De plus, même à service rendu égal, les coûts d'investissement varient beaucoup suivant les sites. Bien sur, dans les pays développés, on a commencé par les sites les plus rentables, pour s'arrêter lorsque cette rentabilité devenait insuffisante.

Impact environnemental

L'impact des centrales hydroélectriques sur l'environnement concerne surtout les modifications de paysage (et parfois les déplacements de population) causés par la construction du barrage et des

retenues et les modifications de la morphologie des cours d'eau, en particulier quand on détourne le cours de la rivière dans des canaux ou conduites, sur des distances plus ou moins longues. Ceci affecte souvent la faune (et singulièrement les poissons) et la flore. Il en va de même pour les variations de niveau de l'eau dans les retenues. Par ailleurs dans les zones tropicales, les émissions de méthane (gaz à effet de serre) peuvent être importantes. Enfin peuvent se poser des problèmes de concentration des micropolluants dans les sédiments et de développement de microorganismes dans les retenues.

Les études d'analyse de cycle de vie ont montré cependant que l'énergie hydroélectrique se plaçait très bien pour la plupart des critères, en particulier les émissions de gaz à effet de serre, les pluies acides, la consommation de ressources.

Situation actuelle dans le monde

La taille des centrales hydroélectriques va de quelques kW (micro hydraulique) à des milliers de MW. Ainsi, en France : 8 % pour celles qui produisent moins de 20 GWh par an, et, à l'autre extrémité 18 % pour celles qui produisent plus de 1000 GWh.

Le tableau 1 fait apparaître que, sur les 14 300 TWh d'électricité produits dans le monde en 1998, 2633 TWh étaient d'origine hydraulique, dont 332 TWh pour le Canada, 322 TWh pour les USA, 291 TWh pour le Brésil, 208 pour la Chine et 66 TWh pour la France. Le continent sud américain se détache nettement avec 72 % d'hydraulique dans la production d'électricité alors que tous les autres continents en comportent environ 15 %.

Perspectives d'évolution

La croissance annuelle observée au niveau mondial était d'environ 2 % par an. Sur le long terme, on prévoit généralement une hausse significative (40% d'ici 2020 d'après l'*International Energy Agency*) de la quantité d'électricité d'origine hydraulique, du fait de la réalisation de grands barrages dans les pays émergents (Chine, Brésil...) car les pays industrialisés sont déjà bien équipés. Les considérations environnementales et les problèmes de financement freinent ce développement. Quoiqu'il en soit, cette hausse ne sera pas suffisante pour que la proportion d'hydraulique dans l'électricité évite de décroître.

Géothermie

La chaleur de la terre augmente avec la profondeur. Les mesures récentes de l'accroissement de la température avec la profondeur, appelée gradient géothermique, ont montré que cette valeur n'était pas uniforme à la surface du globe. En moyenne, la température croît d'environ 3°C pour 100 mètres, mais de nombreuses régions ont des gradients géothermiques anormaux : 10°C par 100 mètres en Alsace et même exceptionnellement 100°C par 100 mètres à Larderello (Italie), par contre 1°C par 100 mètres près de Padoue.

Ce gradient dépend de la conductivité thermique des roches et du flux géothermique qui est de l'ordre de 0,05 W/m², soit environ 4 000 fois moins que la valeur moyenne du flux solaire (200 W/m²). En France il varie entre 0,05 W/m² et 0,13 W/m². Les fortes valeurs sont expliquées par la présence, à quelques milliers de mètres sous la surface de la terre, de roches chaudes correspondant, soit à des poches magmatiques liées à des phénomènes volcaniques actuels ou assez récents, soit à une remontée locale du manteau (partie du globe terrestre, intermédiaire entre le noyau et l'écorce, épaisse de 3.000 km, d'une densité voisine de 5) dont la profondeur habituelle varie de 70 à 2.900 km.

Sur la base de ce critère, on distingue deux sortes d'énergie géothermique fort différentes dans leur manifestation et leurs utilisations :

- **La géothermie basse enthalpie**, due au gradient géothermique moyen ou légèrement supérieur à la moyenne ; elle permet d'obtenir des températures de 80°C à 2000 mètres de profondeur. De par les températures rencontrées, elle s'applique au chauffage des locaux, des serres, à la pisciculture et à quelques usages industriels ou agricoles.
- **La géothermie haute enthalpie**, liée à la présence de roches chaudes peu profondes ; elle permet d'atteindre des températures de l'ordre de 300° C à 1000 mètres de profondeur. Ces hautes températures conviennent à la production d'électricité.

Principaux types de ressources géothermiques.

La chaleur géothermique peut-être exploitée grâce à la présence dans le sous-sol de véritables gisements où se trouve stockée l'énergie calorifique. Selon la nature des terrains, on classera ces gisements en trois catégories : réservoirs de **vapeur**, réservoirs d'**eau chaude**, ou **roches chaudes sèches**.

Les deux premiers types de gisements sont constitués par des infiltrations d'eau circulant dans une couche géologique perméable et poreuse recouverte de terrains imperméables.

Réservoirs de vapeur : Si l'eau de gisement est partiellement vaporisée, elle pourra être récupérée sous la forme de vapeur sèche directement utilisable pour faire tourner les turbines des centrales électriques. Cependant, ces gisements de vapeur sont relativement rares : dans le monde entier, on ne connaît guère que Lardello (Italie), les Geysers (Californie), Matsukawa (Japon).

Réservoirs d'eau chaude : Le plus souvent, l'eau des gisements géothermiques reste liquide et, suivant sa température, elle peut-être utilisée soit pour le chauffage, soit pour la production d'électricité. Dans ce dernier cas, la baisse de pression que subit l'eau chaude pendant sa remontée vers la surface produit sa vaporisation de sorte qu'en tête de puits on dispose d'un mélange diphasique eau-vapeur.

Les gisements de roches chaudes sèches constituent une réserve de chaleur très importante puisque l'exploitation de la chaleur contenue dans une sphère de 1 km de rayon permettrait d'alimenter pendant un siècle une centrale électrique de 100 MW.

Si l'existence du gisement est évidente - il existe en tous points du globe des roches sèches, comme le granit par exemple, qui sont à des températures de l'ordre de 250° à 300° C à 600 mètres de profondeur – son accessibilité reste à démontrer : en effet, pour utiliser cette chaleur, il faut un fluide caloporteur (l'eau par exemple), qui circule dans un échangeur créé artificiellement par fracturation fine de la roche.

L'expérience la plus récente est celle de Soultz-sous-Forêts : il s'agit de faire circuler de l'eau vers 3500 mètres sous terre afin de récupérer 50 MW thermiques à moins de 200 °C pour générer 5 MW électriques. D'importants progrès restent nécessaires avant d'exploiter ce type de gisement qui représente la majeure partie du potentiel géothermique mondial.

Aperçu des techniques d'exploitation.

En géothermie basse enthalpie : l'exploitation se fait à l'aide de forages. Dans la majorité des cas, l'eau étant saumâtre, on prévoit un puit d'arrivée d'eau chaude et un puit de réinjection, ce qui permet aussi de maintenir la pression dans la nappe aquifère. La réinjection provoque, de façon très lente le refroidissement du gisement : il y a donc une baisse progressive de l'énergie récupérée après une période d'exploitation d'environ 30 ans. En raison de risques de corrosion, l'eau géothermale ne circule pas directement dans les appareils de chauffage chez l'utilisateur : on utilise un échangeur de chaleur avec un circuit secondaire d'eau douce. On peut aussi utiliser un système de pompes à

chaleur afin de mieux valoriser l'investissement d'un doublet de forage (l'eau géothermale est ainsi réinjectée à très basse température).

En géothermie haute entalpie : dans les rares cas où de la vapeur sèche peut être récupérée, l'exploitation est simple puisqu'on a affaire à une centrale thermique dans laquelle la vapeur est fabriquée gratuitement. Dans la majorité des cas, c'est un mélange eau-vapeur que l'on récupère. Il faut alors séparer les deux phases avant d'utiliser la vapeur. Dans les deux cas, on utilise généralement un cycle ouvert.

La place de l'énergie géothermique

Données économiques

L'intérêt économique des centrales électriques géothermiques dépend beaucoup du gisement. Là où de la vapeur sèche ou de l'eau chaude à haute température est disponible en grande quantité, par exemple en Californie ou au Mexique, le système est facilement rentable. Pour les gisements de faible potentiel, la petite taille des installations et les mauvais rendements rendent l'investissement cher (par exemple plus de 30 000 F par kW à Bouillante, en Guadeloupe), ce qui nuit beaucoup à son développement.

Une bonne méthode d'analyse de l'intérêt économique des installations géothermiques (comme de beaucoup d'installations thermiques et qui permet d'éviter les pièges d'une croyance excessive dans les rendements d'échelle ou les effets d'industrialisation) consiste à découper mentalement l'installation en deux :

- fourniture de calories à une température donnée,
- transformation de ces calories en électricité (sur laquelle tout progrès profitera aussi aux autres filières)

Impact environnemental

Les impacts environnementaux de cette énergie presque renouvelable concernent le plus souvent le rejet en surface de l'eau résiduaire fortement chargée en sels (quand il n'y a pas réinjection) et les émissions de gaz incondensables, comme l'H₂S qui a une odeur nauséabonde.

Situation actuelle dans le monde

On notera sur le tableau 1, que sur les 14 400 TWh d'électricité produits dans le monde en 1998, 45 TWh étaient d'origine géothermique, dont 15,5 TWh pour les USA, 9 TWh pour les Philippines, 5,5 TWh pour le Mexique et 4,2 TWh pour l'Italie.

La situation est plus difficile à établir pour le chauffage géothermique, mais au niveau mondial des recoupements permettent d'estimer à environ 40 le nombre de TWh thermiques dont 6 en Islande et 2 en France.

Perspectives d'évolution

La croissance annuelle observée historiquement au niveau mondial était assez faible. Le développement dépend énormément de la présence de gisements sous forme facile à exploiter. Sur le long terme, on prévoit généralement une hausse significative de cette forme de production en Asie, Amérique centrale et Asie.

Le bilans énergétiques établis par les institutions internationales utilisent des coefficients de conversion entre les différentes formes d'énergie, pour aboutir à une unité commune, qui est souvent la tep (tonne équivalent pétrole). Il convient cependant de prendre beaucoup de précautions avec ces formulations trop simplifiées. Ainsi 1 kWh d'origine hydraulique se voit attribuer une équivalence de 86 grammes de pétrole tandis que 1 kWh d'origine géothermique se voit attribuer une équivalence de 860 grammes de pétrole.

En ce qui concerne l'impact écologique, il est recommandé de faire appel à l'Analyse de Cycle de Vie, qui permet d'estimer les flux de produits émis et de ressources utilisées dans toute la chaîne d'opérations nécessaire pour assurer des services similaires (par exemple produire 1 kW en continu toute une année ou chauffer une habitation pendant un hiver) par différentes voies.

TABLEAU 1

Zone		Hydraulique	Géothermie	Total électricité
Amérique du Nord	<i>dont</i>	678,6	21,1	4576
	<i>USA</i>	322	15,4	3832
	<i>Canada</i>	332		562
	<i>Mexique</i>	24,6	5,7	182
Amérique centrale et du Sud	<i>dont</i>	520	1	720
	<i>Brésil</i>	291		322
	<i>Argentine</i>	27		74
	<i>Venezuela</i>	58		81
	<i>Paraguay</i>	51		51
Europe	<i>dont</i>	580	5	3190
	<i>France</i>	66		511
	<i>Allemagne</i>	21		556
	<i>Italie</i>	47	4	26
	<i>Suède</i>	74		158
	<i>Norvège</i>	116		117
	<i>autres pays OCDE</i>	207		1664
Afrique	<i>dont</i>	73	0,4	416
	<i>Afrique du Sud</i>	4		205
	<i>Egypte</i>	12		63
Océanie	<i>dont</i>	50	4,8	311
	<i>Australie</i>	16		195
	<i>Nouvelle Zélande</i>	24	2,5	38
	<i>Indonésie</i>	10	2,3	78
Ex URSS	<i>dont</i>	226		1180
	<i>Russie</i>	159		827
Asie	<i>dont</i>	506	12,5	3920
	<i>Japon</i>	102	3,5	1046
	<i>Chine</i>	208		1166
	<i>Inde</i>	83		494
	<i>Corée</i>	6		237
	<i>Philippines</i>	5	9	41
Total monde		2633,6	44,8	14313

Références bibliographiques :

- International Energy Agency : World Energy Outlook 2000
- Pierre HENRY : Turbomachines Hydrauliques aux Presses Polytechniques et Universitaires Romandes
- International Energy Agency : Electricity Information 2000
- EDF : Bilan Environnement 2000 : Pour un développement durable
- EDF : l'énergie géothermique (très ancien)

Et sur internet :

<http://www.edf.fr>

<http://www.ademe.fr>