

L'énergie hydroélectrique et les barrages

Le département d'Hydraulique et de Transport (Professeurs E. Eskenazi, A. Lejeune, J. Marchal et M. Pirotton) couvrent des activités de recherches dans les domaines de la mécanique des fluides, de l'hydraulique, de l'hydraulique appliquée, des constructions hydrauliques, de la gestion et de l'optimisation des ressources hydrauliques, de la construction navale et des transports.

Dans son laboratoire, il présentera deux sujets :

- L'énergie hydroélectrique et les barrages
- L'énergie due aux vagues

Cette partie traite de l'énergie hydroélectrique et les barrages.

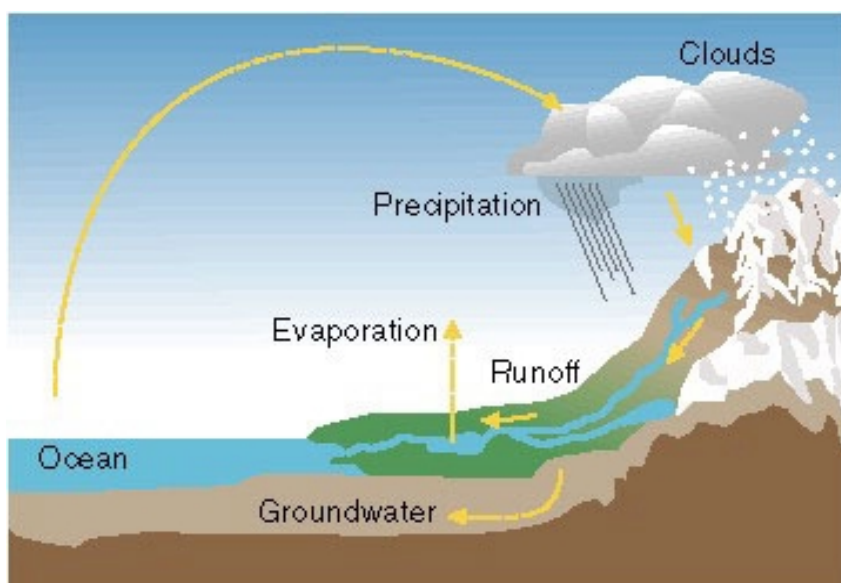
Un cinquième soit 20% de l'énergie électrique à travers le monde, provient de l'énergie hydroélectrique qui est associée aux barrages. Utiliser la force de l'eau (débit et chute) afin de produire de l'énergie, est un choix écologique et économique rendu possible par les ingénieurs. C'est une source d'énergie respectueuse de l'environnement, économique et fiable.

Partout dans le monde, l'hydroélectricité met en valeur une richesse naturelle importante et produit une énergie propre et entièrement renouvelable, sans aucune émission de gaz à effet de serre.

A la différence des centrales thermiques, les aménagements hydrauliques démarrent presque instantanément. La centrale de Grand-Maison, par exemple, peut fournir en moins de trois minutes une puissance de 1 800 MW, soit l'équivalent de deux centrales nucléaires standard. Lorsque la demande en électricité risque de dépasser sa production, la rapide mise en route des usines hydroélectriques met le pays à l'abri d'un éventuel manque d'énergie.

Stocker l'eau, c'est stocker l'électricité

En grande quantité, l'électricité n'est pas stockable. En revanche, l'eau peut être emmagasinée dans des réservoirs avant d'être transformée, le moment venu, en courant électrique. Ainsi, les réserves



d'eau des barrages constituées l'été lors de la fonte des neiges, servent à satisfaire les besoins en électricité l'hiver. Quant aux retenues d'eau plus modestes des barrages de moyenne chute, elles sont régulièrement mobilisées pour répondre aux hausses de consommation constatées à certaines heures de la journée. Ces retenues d'eau constituent de véritables réserves à kilowatt saisonnières ou hebdomadaires, indispensables à la régulation du système de production d'électricité

L'eau : une source d'énergie renouvelable et propre

Après avoir traversé les turbines des barrages, les eaux rejoignent les rivières, puis les fleuves, pour enfin se jeter dans l'océan, le plus grand réservoir d'eau terrestre. Sous l'effet du soleil, l'eau des océans s'évapore, gonfle les nuages qui arroseront de pluie ou de neige les plaines et les montagnes.

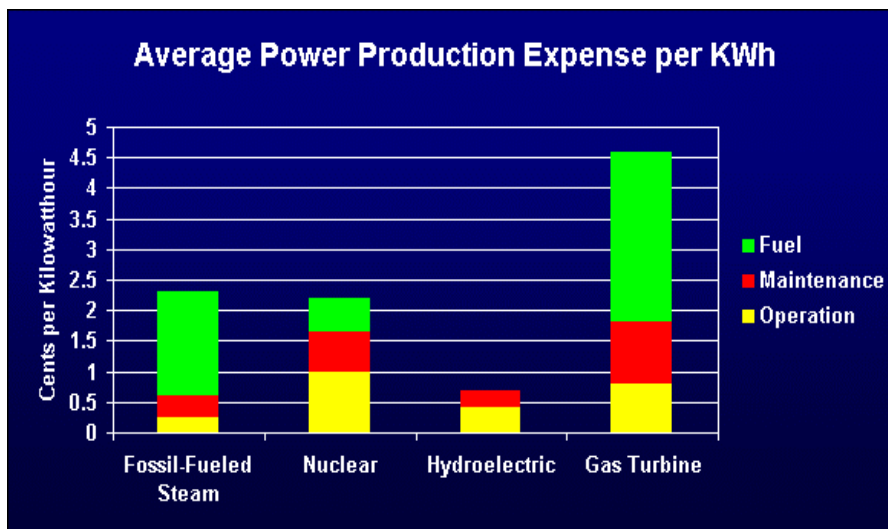


Barrage de Butgenbach . Vue amont

La boucle est alors bouclée. C'est le cycle de l'eau. Chaque année, les barrages profitent de cette énergie naturelle, gratuite et indéfiniment renouvelable. Comme les ancestrales roues à aubes tournant sous la simple action du courant, les turbines des centrales hydroélectriques sont animées par la force d'une eau passant d'un niveau élevé à un niveau inférieur. Dans ce processus, aucune fumée ne s'échappe et l'eau reste une source d'énergie essentiellement non-polluante. En effet, les conséquences de l'exploitation hydraulique (accumulation de sédiments ou de déchets flottants, variation rapide du débit des cours d'eau, différences de températures...) sont maintenant bien connues et maîtrisées.

L'eau : un bien collectif à partager

L'eau est un bien collectif qu'il faut préserver et partager. Une fois libérée des réservoirs des barrages, l'eau continue son parcours pour servir de nombreux secteurs d'activités. Pêcheurs, mariniers, industriels, agriculteurs, collectivités, promeneurs, tous doivent pouvoir utiliser cette ressource. Elle doit donc être partagée en tenant compte des besoins de chacun.



Dans ce sens, des aménagements mixtes, associant la production d'électricité à un autre usage de l'eau ont été construits. Ces réalisations ont déjà démontré leur efficacité. Les barrages du Rhin équipés d'écluses ont ainsi rendu possible la navigation. Ceux de la Durance et du Verdon sont utilisés pour l'irrigation des vergers et des cultures maraîchères. Quant aux réservoirs de haute montagne, ils se trans-

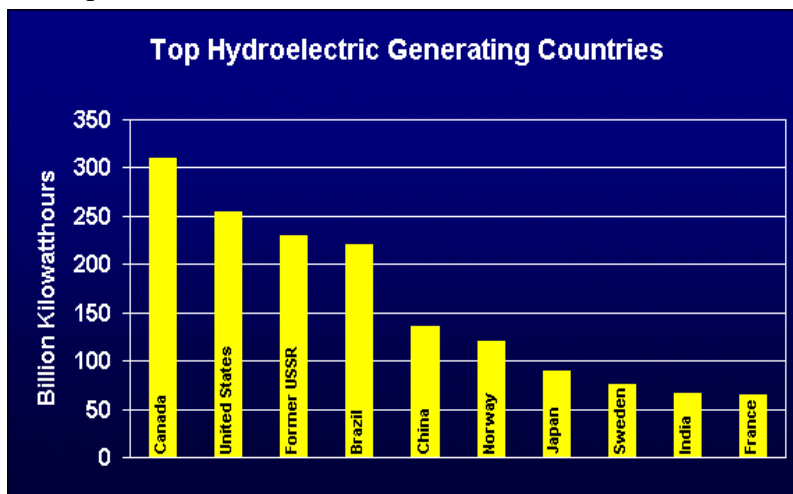
forment l'été en bases nautiques qui font le bonheur des touristes et des sportifs.

Ces quelques exemples donnent une idée de la variété des fonctions qui peuvent compléter la production d'électricité. L'exploitation par EDF des aménagements hydrauliques tient de plus en plus compte des autres usages de l'eau et des contraintes que cela induit. Ce qui témoigne d'une volonté collective d'optimiser la gestion de l'eau.

Les aménagements hydrauliques aident également à faire face à des situations climatiques exceptionnelles. Des sécheresses prolongées peuvent ainsi être combattues en libérant les réserves d'eau des usines de haute montagne. A l'inverse, pendant les périodes de fortes crues, les volumes de ces retenues seront gérés de manière à éviter les inondations. En période de crue, c'est la gestion de la rivière qui est prioritaire sur la production d'électricité.

Un coût d'exploitation modéré

En dépit d'un lourd investissement initial nécessaire à la construction des barrages, les aménagements hydrauliques restent à long terme des équipements très rentables. Comparés aux centrales thermiques, ils produisent un kilowatt moins cher, grâce à l'exploitation d'un "combustible" gratuit et renouvelable. De plus, les centrales hydrauliques exigent une maintenance réduite et ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.



Economique et rapidement mobilisable, l'énergie d'origine hydraulique est avantageusement utilisée lors des pics de consommation. Elle permet d'éviter la mise en route coûteuse de centrales thermiques supplémentaires et d'économiser de cette manière le combustible fossile ou nucléaire. En Europe, il existe plus de 4000 barrages dépassant 15 mètres de hauteur. La moitié d'entre eux est utilisée pour la production d'électricité. Sur les 580 milliards de kWh générés par ces installations, 200

sont fournis par les pays nordiques riches en lacs et en rivières. La production d'électricité de la Norvège est presque entièrement assurée par ces barrages. Les pays alpins (Italie, Suisse, Autriche et France) et ibériques (Espagne et Portugal) captent les trois quarts des ressources en eau de leurs montagnes pour alimenter les turbines des centrales hydroélectriques (210 milliards de kWh d'électricité chaque année pour ces 6 pays). Grâce à ce formidable réservoir à énergie, 70 % des besoins en électricité de l'Autriche et 60 % de ceux de la Suisse sont couverts. Quant au Portugal, à l'Italie, l'Espagne et la France, l'énergie d'origine hydraulique représente respectivement 32, 20 et 16 et 14 % de leur production nationale.

Sur le Danube, la Roumanie et l'ex-Yougoslavie se sont associées en 1970 pour édifier la centrale de la Porte de Fer qui fournit 5,2 milliards de kWh par an à chacun des partenaires, ce qui constitue un record pour l'Europe.

L'Angleterre, la Pologne ou les Pays Bas, riches en combustibles fossiles (ou pauvres en ressources hydrauliques) ont préféré investir dans d'autres modes de production d'énergie. Les barrages de l'Angleterre sont essentiellement consacrés à l'alimentation en eau potable. La production d'électricité constitue une activité secondaire (1 % de l'électricité consommée).

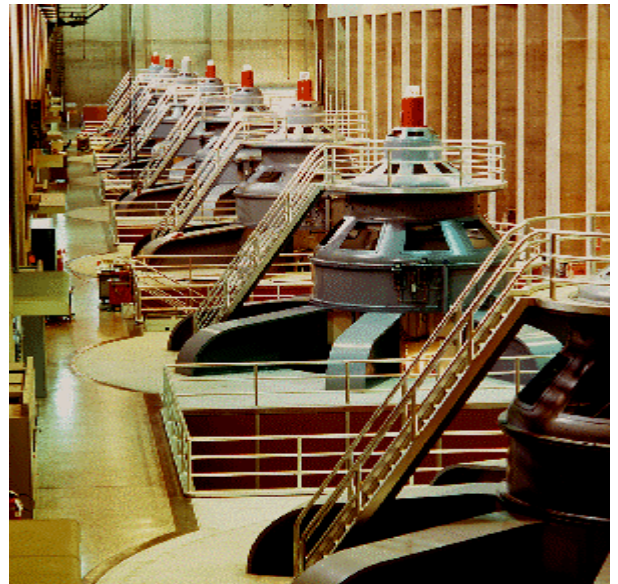
Actuellement, on estime à 843 milliards de kWh le potentiel hydroélectrique en Europe, dont 70 % sont déjà exploités. Ces dernières années, la course à la construction s'est donc notablement ralentie, d'autant que la consommation d'électricité a tendance à se stabiliser. Les nouveaux aménagements

sont ainsi conçus pour répondre à plusieurs besoins à la fois. Dans les régions sèches ou fortement peuplées (Italie, Portugal, Espagne, Sud de la France, proximité de grandes agglomérations...), des aménagements à buts multiples peuvent servir simultanément à la production d'électricité, l'irrigation des terres et à l'alimentation en eau potable, alors que dans des régions pluvieuses, ils seront utilisés pour le contrôle des crues ou la navigation.

La production hydraulique dans le monde

Actuellement, la production mondiale d'énergie électrique est chaque année d'environ 14 500 milliards de kWh dont 64 % proviennent des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz), 18 % des ressources hydrauliques, 17 % des combustibles nucléaires et 1 % des autres sources d'énergie. Ces chiffres montrent l'importance considérable de l'énergie d'origine hydraulique dans le monde. La proportion d'hydroélectricité varie beaucoup d'un pays à l'autre, et, dans chaque pays, elle est susceptible d'évoluer dans le temps en fonction des ressources disponibles, du coût des autres modes de production et de la politique énergétique nationale.

Origine	Production hydroélectrique par an en milliards de kWh (TWh)
Asie	600 TWh
Amérique du Nord	570 TWh
Europe	580 TWh
Amérique Centrale et du sud	390 TWh
Etats de l'ex-URSS	220 TWh
Océanie	78 TWh
Afrique	52 TWh



Comment produire de l'énergie électrique avec de l'eau

Il faut la combinaison d'un débit Q (m^3/s) et d'une chute H (m) qui est la différence entre un point haut et un point bas de niveau d'eau.

La puissance installée P est alors égale à $P=QH\rho g\eta$ en kW

où ρ est la masse spécifique de l'eau et

η est le rendement de l'installation

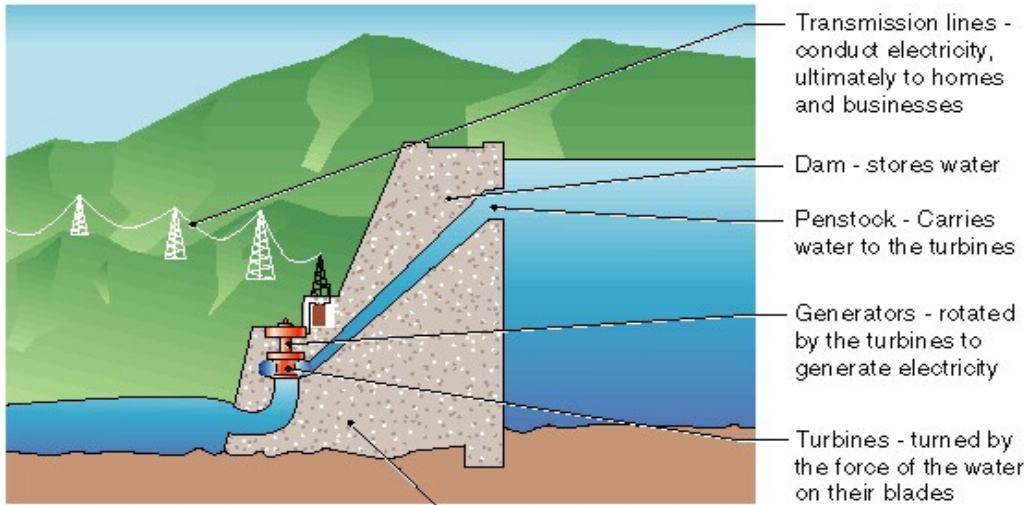
L'énergie produite est $E=Pt$ en kWh

où t est le temps que dure la production de la puissance

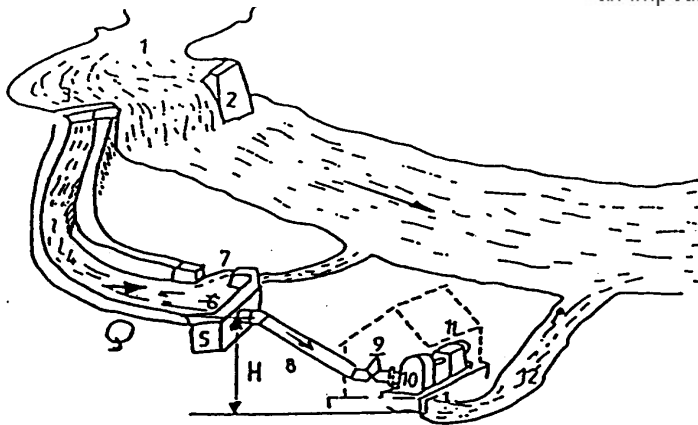
L'énergie de l'eau est transformée en énergie mécanique de rotation par la turbine est ensuite par l'alternateur en électricité.

Energie hydroélectrique et barrages

Faculté des Sciences Appliquée, Département d'Hydraulique et de Transport
E.ESKENASY, A.LEJEUNE, J.MARCHAL et M. PIROTON



Cross section of conventional hydropower facility that uses an impoundment dam



- Légende : 1. rivière
2. barrage avec déversoir
3. contrôle canal d'amenée
4. canal d'amenée
5. structure pour l'entrée, conduit à la turbine
6. grille d'arrêt ou ratelier
7. débordement
8. conduit à la turbine
9. valve
10. turbine
11. génératrice électrique
12. canal d'évacuation.



Barrage de Robertville

dans le cadre du Printemps des Sciences 2002

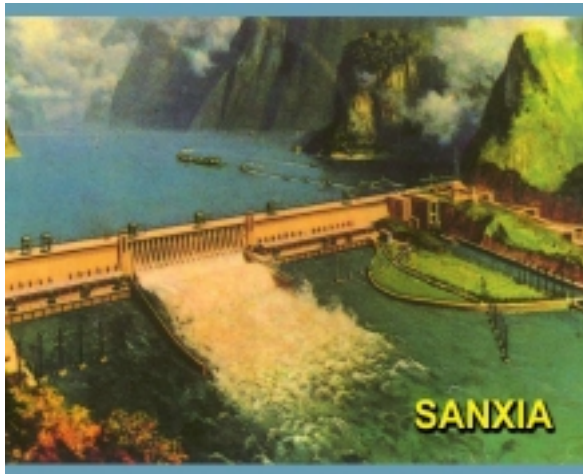
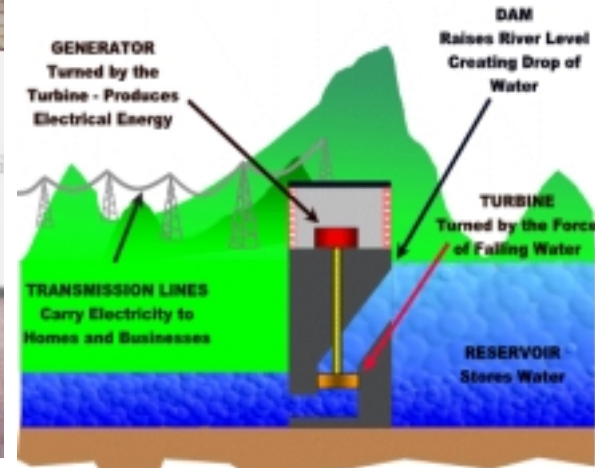
<http://www.ulg.ac.be/sciences>

Université de Liège - Haute Ecole Charlemagne - Hemes

Les métiers de l'énergie - Ingénieurs de l'énergie



Mini centrale à Stavelot



Barrage des trois Gorges en Chine



Barrage d'Itaipu au Brésil



Etude du barrage de Nam Thun. Laos. Ulg

Les dix retenues françaises à vocation

dans le cadre du Printemps des Sciences 2002

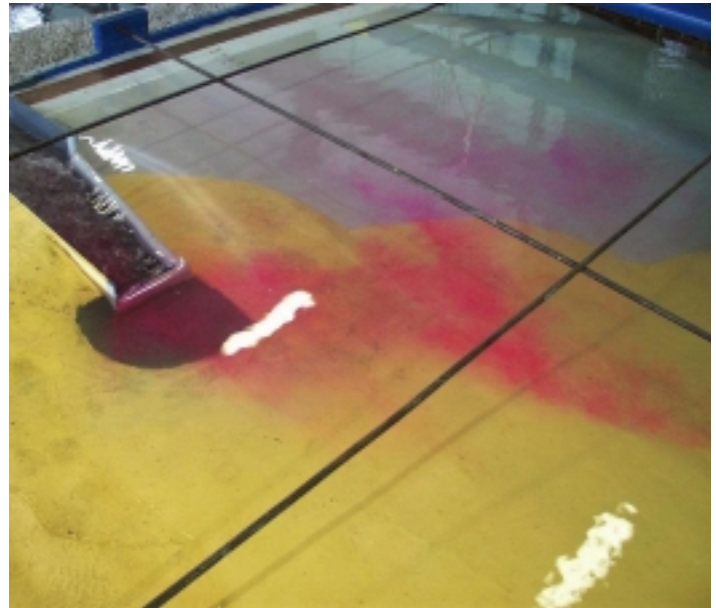
<http://www.ulg.ac.be/sciences>

Université de Liège - Haute Ecole Charlemagne - Hemes

Les métiers de l'énergie - Ingénieurs de l'énergie

hydroélectrique les plus importantes (1 hm³ = 1 million de m³)

Barrage	Volume
Petit-Saut	3500 hm ³
Serre-Ponçon	1272 hm ³
Sainte Croix	761 hm ³
Vouglans	605 hm ³
Bort Les Orques	477 hm ³
Mont-Cenis	333 hm ³
Sarrans	296 hm ³
Monteynard	275 hm ³
Grandval	271 hm ³
Tignes	230 hm ³



Etude du barrage de Lag Algérie . Ulg

Chaque barrage est un cas particulier par ses dimensions, la nature du terrain sur lequel il s'appuie, l'importance des débits dans la rivière... Toutefois, par sa conception générale et les matériaux qui le constituent, il peut généralement être classé dans l'un des types présentés dans les paragraphes suivants :

L'ingéniosité des bâtisseurs de barrages et leur souci constant de s'adapter au mieux aux conditions particulières du site expliquent l'existence d'ouvrages hybrides pouvant comporter plusieurs parties rattachées à l'un des grands types indiqués ci-dessus. C'est par exemple le cas du barrage de Roselend constitué d'une grande voûte complétée par des parties en contreforts.



Barrage de Urft en Allemagne

dans le cadre du Printemps des Sciences 2002

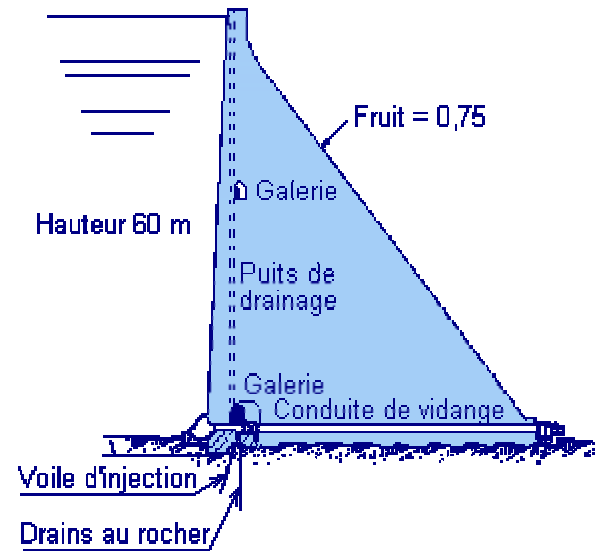
<http://www.ulg.ac.be/sciences>

Université de Liège - Haute Ecole Charlemagne - Hemes

Les métiers de l'énergie - Ingénieurs de l'énergie

Les barrages

1.1.1 Barrages-poids



La stabilité des barrages-poids sous l'effet de la poussée de l'eau est assurée par le poids du matériau. Ces ouvrages peuvent être en maçonnerie ou en béton, en maçonnerie hourdée à la chaux pour les plus anciens, en béton compacté au rouleau pour les plus récents. Ce type de barrage convient bien pour des vallées larges ayant une fondation rocheuse. Ils sont souvent découpés en plots à la construction, l'étanchéité entre plots étant assurée par un dispositif placé à l'amont des joints.

Les formes sont diverses, forme rectangulaire simple pour les plus petits, forme triangulaire de façon classique, formes audacieuses plus élancées dans la partie supérieure à la fois pour des raisons architecturales et de quantité de matériau mis en oeuvre. Au siècle dernier, les maîtres d'œuvre ont cherché à économiser de la matière en raidissant progressivement les parements. Ils ont donné une forme légèrement courbe au tracé en plan du barrage de manière à permettre les mouvements de la structure en évitant l'ouverture des joints, notamment en hiver.

Les ruptures successives du barrage de Bouzey ont amené les constructeurs à plus de prudence en mettant en évidence le rôle joué par les sous-pressions tant dans les fondations que dans le corps du barrage. Les formes les plus fréquentes des barrages-poids modernes sont des profils triangulaires qui se redressent en partie supérieure pour supporter la route de couronnement. Le parement amont est souvent vertical ou avec un fruit très faible.

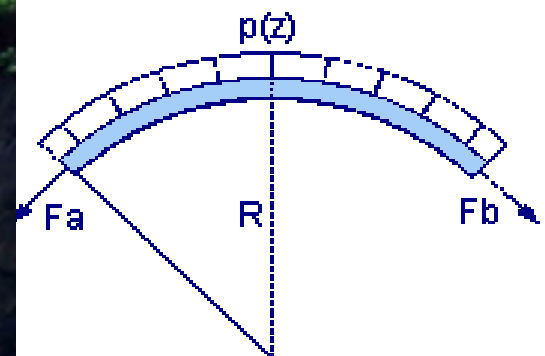
On peut distinguer les barrages pour lesquels les fonctions poids et étanchéité sont assurées de manière conjointe, comme les barrages en maçonnerie "homogène" (bien que le parement amont soit souvent mieux appareillé et/ou recouvert d'un enduit), et ceux pour lesquels les deux fonctions sont parfaitement séparées : barrage-poids à masque amont du type Lévy, barrage-poids en béton compacté au rouleau (BCR) avec membrane d'étanchéité ou masque amont.

La stabilité des barrages-poids repose essentiellement sur leur fruit et, si nécessaire, sur l'efficacité du drainage qui met le massif poids à l'abri des sous-pressions. Leur inconvénient majeur est de ne pas utiliser pleinement les capacités du matériau constituant la partie résistante du barrage (maçonnerie ou béton) à supporter des efforts importants de compression. Il est donc venu rapidement à l'idée des

projeteurs de supprimer du béton superflu en allégeant la structure, en créant des arcades ou des niches sur le parement aval, en réduisant la surface d'assise au sol. Lorsque ces élégissements descendent jusqu'à la fondation, il en résulte une augmentation des contraintes appliquées au sol de fondation. Mais la réduction de la surface d'assise se traduit par un meilleur drainage de ce contact. Les sous-pressions dangereuses pour la stabilité de l'ouvrage sont alors limitées. Pour certains barrages en rivière, les vannes représentent une part importante du parement amont. La structure résistante est alors limitée au socle d'assise et aux contreforts entre vannes.



1.1.2 Barrages-voûtes



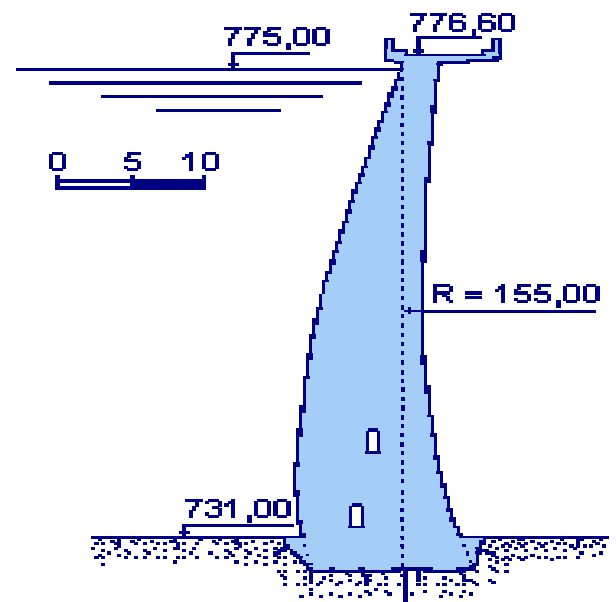
Les barrages-voûtes sont des barrages généralement en béton dont la forme courbe permet un report des

efforts de poussée de l'eau sur les rives rocheuses de la vallée. L'utilisation de l'effet d'arc bien connu des constructeurs de cathédrales est plutôt récent dans le domaine des barrages (encore qu'on en trouve des applications dès le XIII^{ème} siècle en Iran ainsi que, sous une forme plus rustique, par les Romains).

La réalisation d'une voûte est certainement la façon d'utiliser au mieux les capacités du béton à supporter les efforts de compression, de diminuer le volume du matériau à mettre en oeuvre.

Les barrages-poids-voûtes sont des barrages-poids dont la forme nettement arquée rend possible la création d'un véritable effet voûte et donc un report des efforts sur les appuis latéraux. Ce type de barrage convient bien lorsque la topographie permet de fermer la vallée par une forme arquée de longueur réduite sans pour autant avoir une qualité de rocher en fondation suffisante pour admettre des sollicitations ponctuelles fortes de type encastrement. Il s'agit en général de barrages construits dans la première moitié du XX^{ème}.

Le parement amont est en général vertical de manière à simplifier les coffrages. Le parement aval est souvent incliné mais il peut se présenter sous forme de marches d'escalier superposées pour simplifier l'exécution.



Précédées par des voûtes d'une trentaine de mètres de haut dans les années 1920, les grandes voûtes minces ont fait leur apparition au milieu du XX^{ème} siècle. Grâce à des méthodes et des moyens de calculs plus puissants, les formes se sont allégées de manière à économiser de la matière et à faire travailler la structure au maximum de ses possibilités. Les arcs circulaires sont devenus paraboliques, elliptiques ou en spirales logarithmiques. Les parements à double courbure ont été généralisés.

Les projeteurs ont poursuivi dans cette direction jusqu'à connaître les premiers déboires : fissuration de grandes voûtes trop minces eu égard à leur fondation rocheuse très rigide, rupture de la voûte de

Malpasset pour des raisons autres, géologiques notamment. Ils sont alors revenus à des formes moins allégées mais garantissant des coefficients de sécurité plus confortables

Les barrages-voûtes sont construits par plots indépendants. Ceux-ci sont clavés en fin de construction de manière à rendre la voûte monolithique et à solliciter lors de la mise en eau à la fois les arcs et les consoles que sont les plots de construction. La stabilité de ces barrages dépend essentiellement de la capacité (de résistance, de rigidité) de leur fondation à supporter des efforts concentrés au droit des appuis, efforts liés à l'encastrement de la structure, à la poussée des arcs, mais aussi, pour les voûtes minces, aux fortes sollicitations hydrauliques dues à la finesse de la structure.

La présence de culées peut toutefois permettre un report plus aisé des efforts sur les rives.

1.1.3 Barrages à contreforts



Un barrage à contreforts comprend :

- une série de murs parallèles, généralement de forme triangulaire, plus ou moins épais et plus ou moins espacés (les contreforts) ;
- une bouchure entre contreforts transmettant à ceux-ci la poussée de l'eau.

La bouchure peut être constituée :

- d'une dalle plane en béton ;
- d'un élargissement du contrefort vers l'amont ;
- d'une voûte de faible portée.

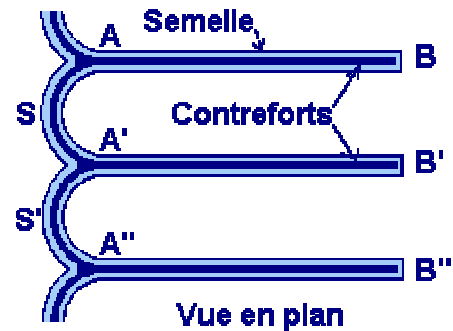
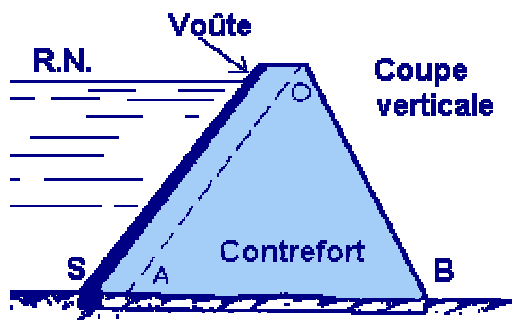
Le nombre de contreforts

peut varier de quelques unités pour les plus grands d'entre eux (barrage de Grandval ou de Calacuccia), à plusieurs dizaines comme sur les barrages de la Girotte, de Roselend et sur les barrages de type Considère (Vezins ou Rophémel).

Pour ces derniers, l'audace des constructeurs est allée jusqu'à réduire l'épaisseur des voûtelettes à quelques dizaines de centimètres, nécessitant le recours au béton armé. Cette épaisseur augmente un peu en partie basse mais demeure réduite à l'approche de la fondation

Les parements amont sont en général fortement inclinés de manière à transmettre directement au pied des contreforts et donc à la fondation rocheuse une partie de la poussée de l'eau sur le parement amont.

Les barrages à contreforts sont bien adaptés aux vallées larges avec une fondation rocheuse de bonne qualité.



1.1.4 Barrages en terre homogène

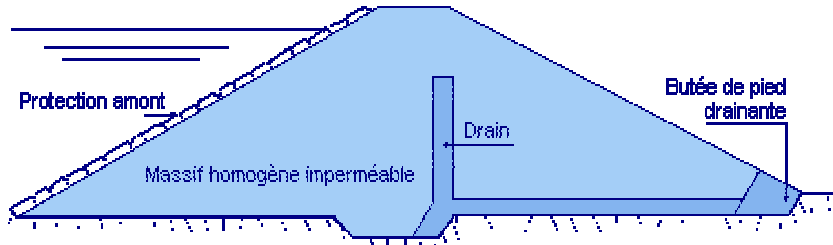


Les barrages en terre homogène sont des digues en remblai constituées d'un seul matériau meuble suffisamment imperméable pour assurer à la fois l'étanchéité et la résistance. La terre est généralement mise en place par compactage. La plupart des barrages français très anciens, dont beaucoup servent à l'alimentation en eau des canaux, sont de ce type.

La structure des barrages est souvent complétée par des dispositifs de drainage tels que :

- une butée aval drainante ;
- un tapis drainant sous le tiers ou la moitié aval ;
- une cheminée drainante communiquant avec l'aval par un tapis ou des bretelles.

Des protections peuvent être disposées sur les faces extérieures : enrochements ou rip-rap sur le parement amont pour éviter l'érosion due aux vagues, terre végétale engazonnée ou enrochements sur le parement aval pour stabiliser la terre vis-à-vis du ruissellement de la pluie.



Ce type de barrages est bien adapté aux sites ayant une fondation déformable. De conception rustique, ils ont une grande emprise au sol, n'engendrent que peu de contraintes, s'accompagnent en fondation de faibles gradients d'écoulement et peuvent accepter des tassements de la fondation.

Par contre, ils ne supportent pas bien les variations rapides du plan d'eau et ne supportent pas ou très peu la submersion par dessus la crête.

1.1.5 Barrages zonés

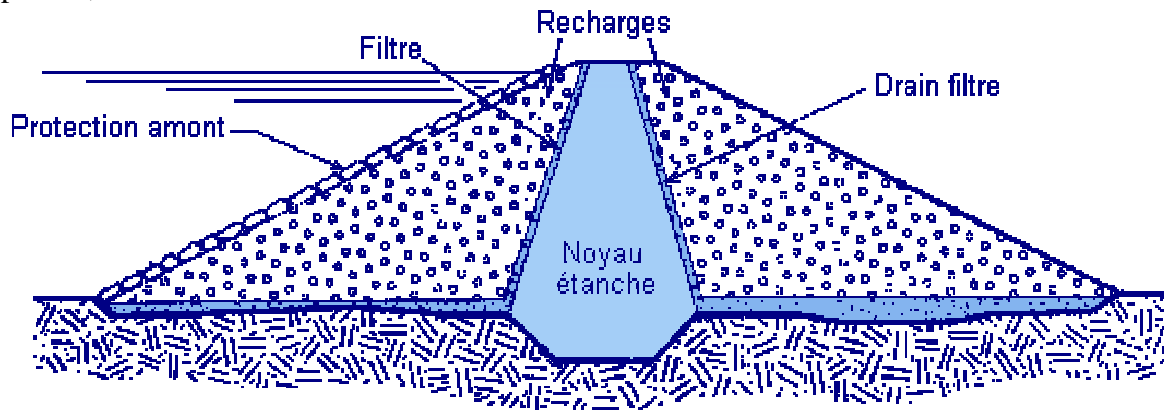
Les barrages zonés, comme le barrage de Serre-Ponçon, sont des barrages en remblai constitués de plusieurs types des matériaux disposés de façon à assurer séparément les fonctions de stabilité du barrage et d'étanchéité. Le découpage du corps du barrage en matériaux différents est appelé zonage. Il permet de faire de grandes économies dans les volumes mis en oeuvre et d'utiliser au mieux les matériaux disponibles sur le site.



Il existe autant de types de zonages que de barrages dans la mesure où chaque ouvrage est conçu en fonction des matériaux trouvés sur le site ou immédiatement à proximité. Les plus classiques comportent :

- un noyau d'étanchéité constitué de terres argileuses, d'argile, de terres caillouteuses ou tout autre matériau terreux comportant une forte proportion de matériaux fins lui conférant une faible perméabi-

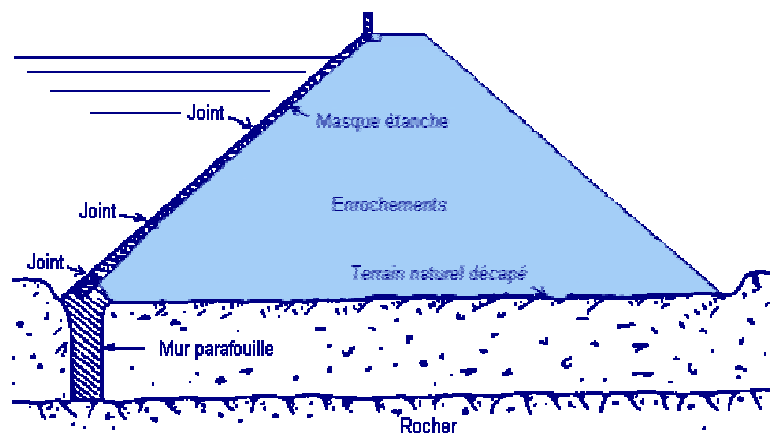
lité. Lorsque ce matériau est introuvable sur le site, on peut avoir recours à des matériaux de substitution tels qu'une paroi moulée ou bien une superposition de couches de béton bitumineux ou d'asphalte ;



- une recharge amont en matériau drainant assurant la stabilité amont même après une vidange rapide ;
 - une recharge aval stabilisatrice en matériau peu déformable ;
 - une protection amont en enrochements, dalles ou autres dispositifs ;
- un drain interposé entre le noyau et la recharge aval, si celle-ci n'est pas suffisamment perméable, pour évacuer sans pression les écoulements parvenus sur la face aval du noyau ;
- des matériaux de transition (filtres) entre ces différents massifs lorsque leurs granulométries respectives le justifient de manière à éviter toute érosion interne par entraînement de particules d'un matériau vers le matériau adjacent.

1.1.6 Barrages à masque

Les barrages à masque sont constitués d'un remblai plus ou moins perméable assurant la stabilité d'ensemble. Un écran imperméable, appelé masque, est mis en place sur le parement amont de façon à rendre le barrage étanche et lui permettre de retenir l'eau du réservoir



Le masque qui constitue l'organe d'étanchéité amont est classiquement réalisé en béton, avec des produits bitumineux ou encore au moyen d'une géomembrane. Son épaisseur est limitée, ce qui lui permet de s'adapter aux déformations faibles mais inévitables du massif support (les géomembranes peuvent même accepter des déformations importantes). La présence du masque en parement amont présente le double avantage de permettre des réparations en cas de dégradation du masque, mais aussi d'autoriser des vidanges de retenue très rapides.

Le corps du barrage assurant la stabilité peut être en matériau quelconque pour autant qu'il soit peu déformable. De nombreux barrages à masque sont réalisés en enrochements. La qualité du compactage lors de la mise en oeuvre du matériau a une grande influence sur les déformations et tassements ultérieurs.

Pour améliorer la sécurité du barrage, il n'est pas rare de trouver dans les barrages à masque d'autres matériaux fonctionnels :

- un matériau de réglage ou de transition servant de support à l'étanchéité mince et la mettant à l'abri de tout poinçonnement par des éléments grossiers du massif support ;
- une cheminée drainante, un tapis drainant ou les deux pour évacuer les infiltrations éventuelles à travers le masque ;
- des matériaux de protection soit du parement aval (terre végétale engazonnée, enrochements, maçonnerie de pierre sèches, ...) soit du masque d'étanchéité comme des dalles de protection ou des pavés auto-bloquants mettant l'étanchéité mince à l'abri des agressions extérieures telles que la glace, les projectiles ou les chutes de blocs.



A l'aide d'une projection animée le département expliquera le fonctionnement d'un aménagement hydroélectrique (barrage, turbines, etc.) et la production d'énergie par l'eau. Il montrera des réalisations importantes en Belgique et à travers le monde.

Etude dans notre laboratoire d'un barrage à déversoir en escaliers. Jordanie. Ulg