



De l'énergie naît l'électricité

Bilans énergétiques
des aménagements
de production

Pour tous les aménagements et centrales qui servent à la production d'électricité, on peut se demander, d'une façon générale, quel est le rapport entre l'électricité produite et l'énergie consommée.

Cette problématique a incité l'Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE) à étudier la qualité énergétique de l'utilisation de la force hydraulique en comparaison avec d'autres installations de production d'électricité. Au total, on a examiné 17 aménagements et centrales de production, et l'on a dressé le bilan énergétique de chacune. On en a tiré différentes caractéristiques énergétiques qui mettent en évidence la qualité énergétique des aménagements de production et qui donnent des informations, notamment, sur le rapport entre la quantité d'énergie produite par une installation et la quantité d'énergie consommée pour sa construction, pour la production d'énergie, ainsi que pour son exploitation, sa production d'électricité, sa démolition et son élimination.

Comme cette étude s'adresse essentiellement à des spécialistes, l'OFEE a décidé d'en publier également une version condensée, plus accessible au profane, et qui présente les bases méthodologiques utilisées ainsi que quelques-uns des résultats obtenus.

Le choix et la présentation des résultats de l'étude figurant dans la première édition de la version courte ont été source de malentendus et d'erreurs d'interprétation. La présente version a été adaptée en conséquence, particulièrement en ce qui concerne le choix des indices énergétiques.

Toute personne que la lecture du présent document incite à découvrir l'étude in extenso, pourra se la procurer à l'Office central fédéral des imprimés et du matériel, 3003 Berne (n° de commande 804.307).

Dans cette optique, l'OFEE espère que ce document suscitera l'intérêt de ceux qui le liront.

Bienne, juin 1997

Auteurs:

Walter Baumgartner
Christoph Muggli
BASICS AG, 8035 Zurich

Graphisme:

Rodolfo Sacchi
8001 Zurich

Traduction:

Pierre Grandjean
3973 Venthône

Copyright:

Office fédéral
de l'économie des eaux
3003 Berne

Source:

Office central fédéral
des imprimés et du matériel
3003 Berne
n° de commande: 804.400 f

2° édition remaniée,
1997

	De quoi s'agit-il?	4
	Qu'est-ce qu'un bilan énergétique?	5
	Un peu de physique: les flux énergétiques	
	Quatre flux d'énergie forment le bilan énergétique	
	De quoi tient-on compte dans le bilan énergétique?	11
	Comment interpréter un bilan énergétique?	14
	Facteurs de gain de différents aménagement de production	15
	Les aménagements de production considérés	18
	Centrale à accumulation de Marmorera/Tinzen	
	Centrale au fil de l'eau à haute pression de Fieschertal	
	Centrale au fil de l'eau d'Aarberg	
	Centrale au fil de l'eau de Bannwil	
	Petite installation éolienne du Simplon	
	Petite installation photovoltaïque (toiture inclinée)	
	Centrale photovoltaïque du Mont Soleil	
	Centrale de chauffage d'îlot de Hardau	
	Centrale à turbine à gaz et à vapeur	
	Centrale oléothermique	
	Centrale à charbon	
	Réacteur à eau bouillante de Leibstadt	

De quoi s'agit-il?

Depuis la nuit des temps, les agriculteurs se demandent quel pourrait être le rapport entre le produit de la récolte et la quantité de semence, d'engrais, etc., utilisée. Plus ce rapport est élevé, mieux leurs champs sont donc exploités.

Dans la production d'électricité, la problématique se pose à peu près dans les mêmes termes: avant de pouvoir produire du courant, il faut d'abord investir de l'énergie, par exemple pour construire et exploiter l'aménagement de production. Ce n'est qu'ensuite que l'on peut «récolter» de l'électricité. Plus le rapport entre la quantité d'électricité produite et l'énergie consommée pour cela est grand, plus la production est efficace.

L'électricité peut être produite de très diverses façons. Les alternatives vont des aménagements hydroélectriques classiques aux centrales nucléaires en passant par la production photovoltaïque à partir du rayonnement solaire.

Pour déterminer la qualité «énergétique» d'une production d'électricité, l'on constate que son critère principal est le «bilan énergétique», qui consiste à imager d'une façon aussi précise que possible tous les flux d'énergie importants qui interviennent dans un aménagement de production. Dans l'appréciation d'un aménagement, on peut tirer plusieurs indices énergétiques caractéristiques, lesquels, à leur tour, permettent de répondre, sous différents angles, à la question de savoir par combien on peut multiplier l'énergie investie dans un aménagement de production.

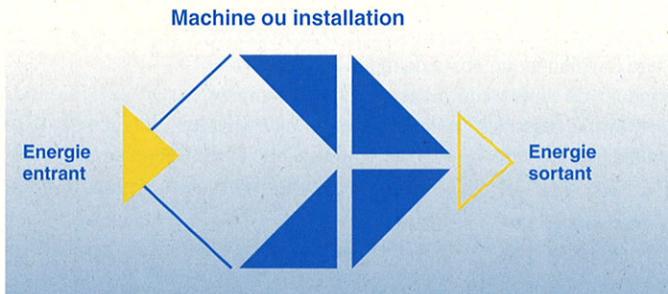
Mis à part ces indices énergétiques, il existe cependant de nombreux autres critères, parfois opposés, qui ont une importance dans la prise de décision pour ou contre un ouvrage de production donné; ces critères n'ont pas été analysés dans cet ouvrage. Les plus importants sont assurément les coûts et la puissance électrique disponible dans l'aménagement de production. Ensuite, jouent également un rôle la disponibilité dans le temps, mais aussi le potentiel global de production. De même, on prendra en compte dans le calcul la sécurité d'approvisionnement ainsi que les coûts externes (avec ou sans la prise en compte du risque d'accidents majeurs) et, sur un plan tout à fait général, la durabilité et l'aspect écologique des agents énergétiques utilisés.

Un peu de physique: les flux d'énergie

Qu'est-ce qu'un bilan énergétique?

Pour comprendre comment on calcule les bilans énergétiques d'installations de production d'électricité, il est nécessaire de rappeler quelques connaissances de base concernant les flux d'énergie.

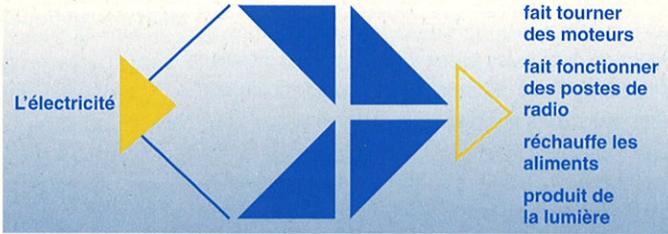
Pour n'importe quelle machine ou installation, on distingue toujours deux flux d'énergie. D'une part, l'énergie qui y entre, d'autre part, l'énergie qui en sort, et qui est quantitativement égale à la première. Cela n'est évidemment vrai que si la machine ou l'installation en question ne stocke pas d'énergie ou, à l'inverse, si aucun accumulateur d'énergie n'y est vidé.



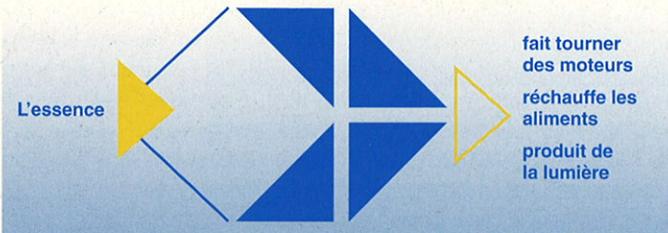
Le principe est donc toujours le suivant: l'énergie fournie à une installation est restituée par celle-ci. Les physiciens appellent ce phénomène «principe de la conservation de l'énergie» et le traduisent en disant que l'énergie ne peut être ni produite ni détruite; on en a toujours autant.

Mais alors, pourquoi l'énergie coûte-t-elle quelque chose? La réponse est la suivante: il existe différentes formes d'énergie et celles-ci sont utilisables à des degrés divers. Certaines tâches seront nettement mieux remplies avec une forme d'énergie utilisable plutôt qu'avec une autre. Trois exemples vont illustrer notre propos.

La forme la plus intéressante d'énergie est **l'électricité**. Elle fait tourner des moteurs, fonctionner des postes de radio, permet de cuire des aliments ou d'illuminer des espaces et bien d'autres choses encore. Si l'électricité est précieuse, c'est surtout parce que, grâce à elle, tout est possible ou presque. Il s'agit donc d'une forme d'énergie dont la valeur est élevée.



Une autre énergie de haute valeur est **l'essence**. Seuls quelques litres suffisent pour permettre à une voiture de parcourir 100 kilomètres. Avec elle, on pourrait également faire la cuisine (avec un peu de prudence, néanmoins!) et produire de la lumière. Mais il est déjà beaucoup plus délicat de vouloir s'en servir pour faire fonctionner un poste de radio. Pour ce faire, il faudrait tout d'abord fabriquer de l'électricité à l'aide d'une génératrice exploitant l'énergie que renferme l'essence, puis utiliser cette électricité pour faire fonctionner la radio.



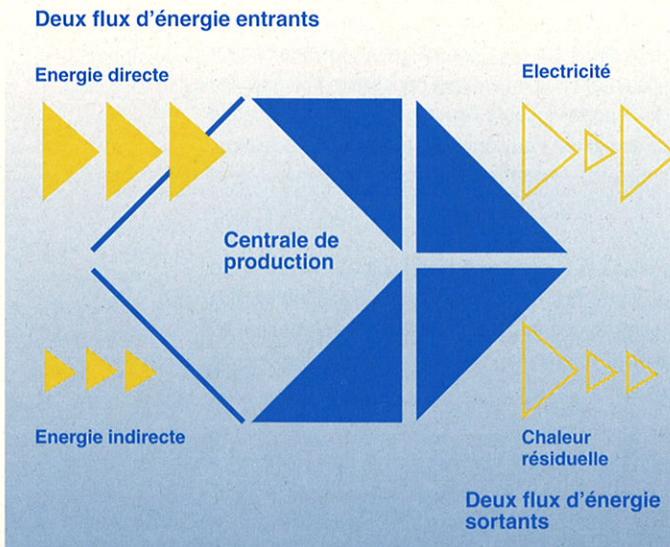
Au contraire de l'électricité et de l'essence, une forme d'énergie telle que la **chaleur résiduelle** – par exemple la chaleur rejetée par une centrale nucléaire – n'est pas de très grande valeur. Cette chaleur s'échappe de la tour de refroidissement de la centrale sous forme d'air chaud humide à une température de 30 à 35 degrés, c'est-à-dire à peine suffisante pour être utilisée immédiatement pour le chauffage. Néanmoins, elle peut servir à chauffer des locaux ou être employée dans des procédés industriels si on la porte à un niveau de température plus élevé. Mais pour cela, il est nécessaire d'accepter une légère diminution de la production d'électricité. Dans une mesure modeste, c'est ce que l'on fait dans les réseaux de chauffage à distance (appelés aussi réseaux de chauffage urbain) pour

chauffer des bâtiments proches d'une centrale ou pour alimenter en chaleur dite de «processus» des entreprises industrielles sises à proximité.



Quatre flux d'énergie forment le bilan énergétique

Une centrale ne produit donc pas d'énergie, elle transforme une forme d'énergie en une autre. Dans les installations de production d'électricité, on distingue quatre types de flux d'énergie, à savoir deux flux qui entrent dans la centrale et deux flux qui en sortent:



Les deux flux d'énergie sortants sont les plus faciles à comprendre. Ce sont:

- l'électricité produite, c'est-à-dire celle qui est fournie au réseau et consommée par les ménages, l'industrie et les entreprises de services.
- la chaleur résiduelle, inévitable. Elle prend, par exemple, la forme des nuages qui sortent des tours de refroidissement des centrales nucléaires. Mais les aménagements hydroélectriques «dégagent» aussi de la chaleur puisque leurs génératrices chauffent lorsqu'elles produisent de l'électricité.

S'agissant des flux d'énergie entrants, on distingue l'énergie «directe» et l'énergie «indirecte»:

- l'énergie «directe» est celle qui est «visiblement» fournie à l'ouvrage pour produire de l'électricité. Il peut s'agir de l'énergie de l'eau dans une centrale hydroélectrique, de l'énergie du combustible nucléaire ou du charbon dans des centrales du même nom.
- les flux d'énergie «indirects» sont invisibles. Il s'agit, par exemple, de l'énergie qu'il faut dépenser pour construire un ouvrage de production. En font également partie l'énergie nécessaire pour extraire le charbon et le transporter jusqu'à l'ouvrage, ainsi que l'énergie consommée pour exploiter l'ouvrage de production (éclairage, chauffage, lubrifiants, etc.), le mettre hors service, le démanteler et l'éliminer.

L'énergie ne peut être ni produite ni détruite, avons-nous vu. Comment ce fait se traduit-il dans ces quatre flux d'énergie? Si l'on additionne les flux d'énergie entrants, leur somme doit être égale à celle que l'on obtient en additionnant les flux sortants. L'énergie fournie à un ouvrage de production doit être restituée par celui-ci.

Mais comment additionner les différentes formes d'énergie? Par exemple de l'essence et de la chaleur résiduelle? Ou de l'électricité et du charbon? Deux facteurs sont importants pour cela:

- Il faut, tout d'abord, convertir les différentes formes d'énergie dans une unité de mesure commune. L'unité généralement utilisée pour l'énergie est le Joule (en abrégé: J). Comme le Joule est une très petite unité, on utilise souvent un multiple, par exemple le mégajoule (= un million de Joule; en abrégé: MJ) ou le térajoule (= un milliard de Joule; en abrégé: TJ). Par ailleurs, dans le domaine de l'électricité, on se sert généralement du kilowattheure (en abrégé: kWh) ou de ses multiples, notamment le gigawattheure (un million de kilowattheures; en abrégé: GWh).
- Pour ramener les différentes énergies à une unité de mesure uniforme, on emploie des facteurs de conversion qui ont été déterminés en laboratoire. C'est ainsi qu'un litre d'essence contient la même quantité d'énergie qu'environ 9 kilowattheures d'électricité. Le tableau ci-dessous donne quelques exemples de facteurs de conversion. On le lit de la façon suivante: un kilowattheure (kWh) d'électricité correspond à 3,6 mégajoule (MJ) en unité générales d'énergie ou à 0,0843 kilogramme (kg) de mazout, à 0,0989 mètre cube (m³) de gaz naturel ou 0,11 litre (l) d'essence.

		Energie	Electricité	Mazout	Gaz naturel	Essence	Facteurs de conversion pour différentes formes d'énergie
		MJ	kWh	kg	m ³	l	
Energie	MJ	1	0.28	0.0234	0.0275	0.0310	
Electricité	kWh	3.60	1	0.0843	0.0989	0.11	
Mazout	kg	42.70	11.86	1	1.17	1.32	
Gaz naturel	m ³	36.40	10.11	0.85	1	1.13	
Essence	l	32.30	8.97	0.76	0.89	1	

En général, on n'utilise pas dans les bilans énergétiques les facteurs de conversion évoqués ci-dessus pour l'électricité, mais des facteurs qui multiplient la valeur de cette dernière par 2,67. Cette appréciation quantitative plus favorable de l'électricité se justifie par le fait que, pour produire une unité d'électricité dans un ouvrage thermique classique, il faudrait environ 2,67 unités de pétrole, de charbon ou de gaz, et que, par conséquent, l'électricité a une «valeur» plus élevée d'autant. Ce facteur correspond à un rendement moyen de 37,5%. Comme l'on considère ici les agents énergétiques (combustibles) dits «primaires» que sont le mazout, le charbon ou le gaz, on parle aussi de valorisation «primaire» de l'électricité. Par ailleurs, cette valorisation de l'électricité peut avoir pour conséquence, sur le plan purement mathématique, le fait qu'il n'est plus vrai qu'une centrale produit autant d'énergie qu'elle n'en reçoit.

Mais alors, qu'est-ce que le «bilan énergétique»? Il n'est rien d'autre que l'enregistrement le plus précis possible des quatre flux énergétiques qui, respectivement, entrent dans un ouvrage de production et en sortent.

De quoi tient-on compte dans un bilan énergétique?

Pour dresser un bilan énergétique, il faut donc chiffrer les quatre flux énergétiques décrits plus haut. Comme, sans la valorisation de l'électricité évoquée plus haut, la somme des deux flux entrant dans l'aménagement est égale à celle des flux qui en sortent, il suffit ici de déterminer trois des quatre flux énergétiques. La quatrième (pour des raisons pratiques, il s'agit toujours de la chaleur résiduelle) peut se calculer facilement par soustraction.

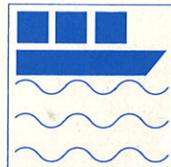
La plus facile à calculer est l'**électricité produite** puisqu'il s'agit de l'électricité fournie au réseau par l'ouvrage de production. Il est aisé de la mesurer à l'aide d'un compteur.

L'**énergie directe**, elle aussi, est assez facile à déterminer. Pour ce faire, on peut mesurer directement l'énergie injectée dans l'installation (p.ex. en pesant le combustible ou en mesurant le volume). On peut aussi passer par le rendement (p. ex. dans un ouvrage hydroélectrique) en divisant la quantité d'électricité produite par cette valeur.

Le calcul de l'**énergie indirecte** est, en revanche, beaucoup plus complexe. Il s'agit ici d'inventorier toute l'énergie «cachée» qui est fournie à l'ouvrage ou qui lui a été fournie. Pour ce faire, il faut déterminer en détail les quantités d'énergie dépensées dans les différents processus, et à quelle fin, pour construire l'ouvrage, fabriquer le combustible, etc. Déterminer ces flux d'énergie est donc le plus important volet de l'établissement d'un bilan énergétique.

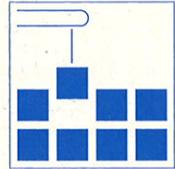
Il faut appréhender dans ses moindres détails la détermination du flux d'énergie indirecte, mais également considérer l'ensemble du cycle de vie de la centrale «du berceau à la tombe», autrement dit, de la production de l'énergie directe (gaz, charbon, etc.) à l'élimination de la centrale, en passant par sa construction.

Dans le cas des ouvrages qui produisent de l'électricité à partir d'énergies non renouvelables, le premier maillon de la chaîne est la **préparation de l'énergie directe**. Il s'agit ici de l'énergie qui est nécessaire pour extraire le gaz, le charbon, le pétrole ou l'uranium du sous-sol, les traiter comme il convient et, finalement, les transporter à destination des usines de production d'énergie. Cette énergie dépend de nombreux facteurs, par exem-



ple du fait que le gaz arrive en Suisse depuis la mer du Nord ou depuis la Russie, ou encore que le combustible nucléaire soit acheté en France ou en Allemagne. Comme la provenance des agents énergétiques importés en Suisse est connue, on peut calculer des valeurs moyennes pour chacun d'eux.

Au stade de la **construction de l'ouvrage de production**, il faut prendre en compte ce qu'on appelle l'énergie de chantier, c'est-à-dire l'énergie consommée tout au long de la construction de l'ouvrage: carburant diesel pour les machines de chantier et les transports, électricité pour les grues, les bétonnières, etc.



Par ailleurs, il faut tenir compte de l'énergie qui est dépensée pour fabriquer les **matériaux de construction** utilisés (par exemple le ciment) et **les machines** (par exemple les turbines). Le tableau ci-dessous chiffre l'énergie consommée pour produire quelques-uns des principaux matériaux.

Matériau	Combustibles (en mégajoule par tonne de matériau)	Electricité (en mégajoule par tonne de matériau)
Aluminium	50'571	62'833
Béton	648	199
Verre	10'201	571
Caoutchouc	24'100	5'159
Mousse isolante	36'110	21'333
Explosif	26'521	1'040
Acier	7'720	5'855
Ciment	3'543	689

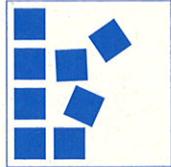
Dépense énergétique nécessaire pour la production de divers matériaux

L'étape principale du calcul de l'énergie indirecte est l'élaboration d'un inventaire précis de ces matériaux. En possession de celui-ci, on peut ensuite, à l'aide du tableau ci-dessus, calculer l'énergie totale contenue dans les matériaux constituant les bâtiments, les barrages, les génératrices, les turbines, etc.

L'exploitation de l'usine de production consomme également de l'énergie. Par exemple, on y utilisera de la graisse pour lubrifier les paliers; il faudra effectuer des transports pour évacuer les boues produites par une centrale au charbon. Même si l'énergie dépensée dans l'exploitation est relativement peu importante, il faut, par principe, la prendre en compte.



Lorsqu'une usine de production a atteint sa durée de vie (technique), il faut la démolir ou, le cas échéant, la renouveler dans son intégralité. Or, la **démolition** provoque aussi – et on l'oublie toujours – des dépenses énergétiques, qu'il faut évidemment considérer dans l'analyse de la consommation d'énergie indirecte.



Enfin, dernière étape de la vie d'une centrale, il faut **l'éliminer**. Cette phase est importante, surtout dans le cas des centrales nucléaires. Le stockage final des déchets radioactifs requiert en effet des constructions techniquement très complexes (par exemple aménagement, surveillance et exploitation de cavernes souterraines), qui supposent un apport énergétique ad hoc. Mais même pour d'autres agents énergétiques se posent des problèmes d'élimination. C'est ainsi, par exemple, qu'il faut construire des décharges appropriées pour stocker les résidus de l'épuration des effluents gazeux d'une centrale au charbon, résidus qui contiennent des métaux lourds.



**Comment
interpréter un
bilan énergétique**

Dans la perspective de l'interprétation d'un bilan énergétique, on peut former plusieurs indices énergétiques. Ceux-ci peuvent, par exemple, exprimer «l'efficacité» d'un ouvrage, c'est-à-dire le nombre de fois qu'il peut produire l'énergie qui y est injectée ou qui y a été injectée.

Il y a plusieurs possibilités de définir de tels indices. Dans les pages suivantes, on propose un indice très parlant: le **facteur de gain**.

Dans le facteur de gain, on compare l'électricité produite avec la dépense énergétique totale, c'est-à-dire la somme des énergies directe et indirecte. Dans la dépense d'énergie directe, on considère cependant uniquement la partie non renouvelable; en d'autres termes, on fait abstraction de l'énergie qui entre dans les aménagements de production considérés par le biais de l'eau, du vent ou du soleil. Ces énergies renouvelables ne sont pas «consommées», raison pour laquelle elles n'entrent pas dans le calcul. A l'inverse, les ressources non renouvelables et finies que sont le gaz, le mazout, le charbon ou l'uranium sont consommées et, par conséquent englobées dans le calcul.

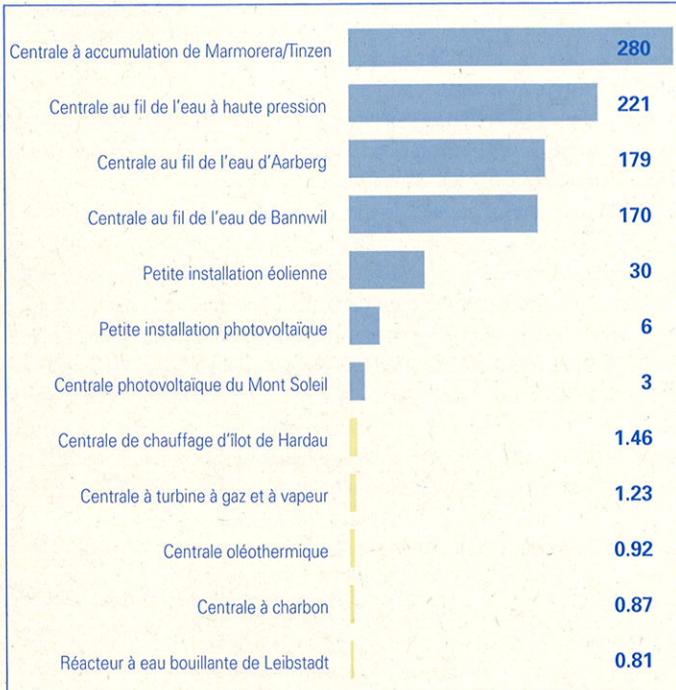
$$\text{Facteur de gain} = \frac{\text{électricité produite}}{\text{énergie indirecte} + \text{énergie directe non renouvelable}}$$

Nous allons maintenant considérer douze ouvrages de production différents (ceux-ci sont présentés en détail au chapitre suivant). Il s'agit en l'occurrence de représentants « typiques » des diverses catégories d'aménagements de production, et la majeure partie d'entre eux sont des installations bien réelles exploitées en Suisse. A titre de comparaison, on a également fait figurer des centrales thermiques fonctionnant avec des agents fossiles, que l'on ne trouve pour ainsi dire plus en Suisse, mais qui pourraient prendre de l'importance dans le futur. Ce sont essentiellement des centrales dites combinées (centrales équipées de turbines à gaz et à vapeur).

Le graphique ci-après illustre les valeurs des facteurs de gain d'énergie primaire. Nous faisons la distinction entre les centrales de production alimentées par des énergies renouvelables et celles qui fonctionnent avec des ressources non renouvelables.

Le premier élément qui frappe lorsque l'on considère les aménagements de production alimentés par des énergies renouvelables, c'est la plage de variation des facteurs de gain: la valeur la plus élevée se situe à 280, la plus faible est égale à 3. Les facteurs de gain sont donc tous supérieurs à 1, c'est-à-dire que les centrales examinées produisent toutes plus d'énergie sous forme d'électricité que ce qu'il a fallu y investir en énergie non renouvelable. Sous cet angle, toutes les installations sont donc énergétiquement judicieuses. Et il n'est pas étonnant de constater que les aménagements hydrauliques sont extrêmement intéressants puisque ce sont eux qui présentent les gains d'énergie les plus élevés, leurs facteurs de gain se situant tous entre 170 et 280. La centrale éolienne vient au milieu avec un facteur de gain de 30. Quant aux facteurs de gain de l'utilisation photovoltaïque de l'énergie solaire, ils sont de l'ordre de 3 à 6, toujours dans les conditions régnant en Suisse. Il ne faut cependant pas perdre de vue que les différents aménagements de production correspondent à des états de développement technique très variables: alors que, par exemple, les centrales hydrauliques peuvent être considérées comme techniquement au point, force est de constater que la production photovoltaïque d'électricité a devant elle encore une grande marge de progression sur le plan technique, autrement dit, une grande amélioration de son rendement.

Facteurs de gain d'énergie primaire



Facteurs de gain
d'énergie primaire

- en bleu: centrales alimentées par des énergies renouvelables
- en jaune: centrales alimentées par des énergies non renouvelables

S'agissant des **installations produisant du courant électrique à partir d'énergies non renouvelables**, les facteurs de gain varient peu. Ils sont tous proches de 1, c'est-à-dire que ces ouvrages produisent à peu près autant d'électricité qu'il leur faut globalement d'énergie non renouvelable (directe et indirecte). Si l'on considère les différents facteurs de gain, on constate que ce sont la centrale de chauffage d'îlot (1,46) et la centrale à turbines à gaz et à vapeur (1,23) qui affichent les valeurs les plus élevées. Ces systèmes utilisent plus efficacement que les autres installations l'énergie contenue dans les carburants: la centrale de chauffage d'îlot y parvient grâce à une large utilisation des rejets de chaleur pour le chauffage. Quant à la centrale à turbines à gaz et à vapeur, elle utilise les effluents gazeux chauds de la turbine à gaz une seconde fois dans la turbine à vapeur montée en aval, laquelle produit de l'électricité. Les autres aménagements (centrale oléothermique, centrale à charbon et réacteur à eau bouillante) sont très proches les uns des autres, avec des facteurs de gain situés entre 0,92 et 0,81.

Nous allons maintenant présenter brièvement les douze aménagements ou installations examinés et les caractériser chacun par quelques indices importants. Toutes les valeurs énergétiques indiquées en térajoule (TJ) correspondent à l'énergie primaire, c'est-à-dire que l'électricité a toujours une valeur 2,67 fois plus élevée que les combustibles. Par conséquent, il est possible, sur le plan purement mathématique, que dans les ouvrages fonctionnant avec des énergies non renouvelables, l'énergie directe non renouvelable soit inférieure à l'énergie produite. La plupart des chiffres sont arrondis. On a choisi de présenter les aménagements dans l'ordre décroissant des facteurs de gain.

Les aménagements de production considérés

Marmorera/Tinzen est l'usine de production dont l'altitude est la plus élevée du groupe des aménagements réalisés aux Grisons par les Services industriels de la ville de Zurich (EWZ). Elle se trouve peu au-dessous du col du Julier. Il s'agit d'un aménagement à accumulation comportant le barrage de Castiletto (Marmorera), d'une galerie à écoulement sous pression de 9,5 km de long, puis d'une conduite forcée et de la centrale de Tinzen (Tinizong). L'ouvrage a été construit entre 1950 et 1954. La digue en terre de Marmorera forme un lac d'accumulation, d'une capacité de 60 millions de mètres cubes. Le bassin versant de la Julia, la rivière qui l'alimente, a une superficie de 89 km². La centrale de Tinzen abrite deux turbines Pelton doubles de 25 MW chacune et une turbine Pelton simple de 17 MW de puissance. Comme l'eau stockée dans le lac de Marmorera est également utilisée par des centrales situées en aval (Tiefencastel Est, Sils et Rothenbrunnen), les dépenses énergétiques consenties pour la construction du barrage sont réparties en fonction de l'utilisation de l'eau et imputées à raison de 45,6% seulement à la centrale de Tinzen.



Centrale à accumulation de Marmorera/Tinzen

Puissance	64 MW
Débit équipé	16.1 m ³ /sec
Chute maximale	479 m
Production annuelle moyenne escomptée (nette)	190.8 GWh
Rendement	85.8%
Durée de vie de l'ouvrage	80 ans
Energie indirecte totale	524 TJ
Energie directe totale non renouvelable	0 TJ
Energie totale produite	146'700 TJ
Facteur de gain d'énergie primaire	280

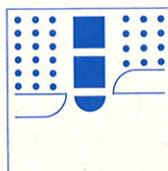
La centrale de Fieschertal d'Electricité Neuchâteloise SA exploite les eaux du glacier de Fiesch dans la vallée du même nom. En lieu et place d'un bassin d'accumulation, on a construit une galerie de rétention (dotée d'une fenêtre de purge) d'une capacité utile de 40'000 mètres cubes. La galerie est précédée en amont d'un dégraveur de 30 m de long et d'un dessableur de 80 m de long.



Centrale au fil de l'eau à haute pression de Fieschertal

Puissance	60 MW
Débit équipé	14.2 m ³ /sec
Chute maximale	525.5 m
Production annuelle moyenne escomptée (nette)	110 GWh
Rendement	85.8 %
Durée de vie de l'ouvrage	80 ans
Energie indirecte totale	382 TJ
Energie directe totale non renouvelable	0 TJ
Energie totale produite	84'500 TJ
Facteur de gain d'énergie primaire	221

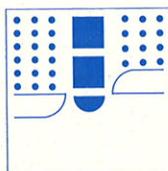
La centrale hydroélectrique d'Aarberg des FMB Energie SA se situe au début du canal de Hagneck, à l'endroit où il quitte l'Alte Aare. Construit entre 1963 et 1968, l'aménagement est le dernier site propice à l'utilisation du tronçon de l'Aar entre Berne et le lac de Biene. La centrale principale comporte la salle des machines, dotée de deux turbines Kaplan verticales de 7,2 MW de puissance chacune.



Centrale au fil de l'eau d'Aarberg

Puissance	13.8 MW
Débit équipé	170 m ³ /sec
Chute	9.9 m
Production annuelle moyenne escomptée (nette)	83.5 GWh
Rendement	84.7 %
Durée de vie de l'ouvrage	80 ans
Energie indirecte totale	364 TJ
Energie directe totale non renouvelable	0 TJ
Energie totale produite	65'000 TJ
Facteur de gain d'énergie primaire	179

La centrale de Bannwil a été construite sur l'Aar par les FMB Energie SA entre 1966 et 1970 dans le cadre de la «seconde correction des eaux du Jura». L'usine se situe en aval de Soleure, entre les centrales de Flumenthal et de Wynau. Le bief amont de l'ancienne centrale de Bannwil a été partiellement remblayé et fait partie aujourd'hui d'une zone protégée. Dans la centrale sont installées trois turbines Kaplan de 8,42 MW de puissance chacune. La chaleur produite par les génératrices est utilisée pour chauffer le bâtiment, via une pompe à chaleur.



Centrale au fil de l'eau de Bannwil

Puissance	24.5 MW
Débit équipé	350 m ³ /sec
Chute	8.1 m
Production annuelle moyenne escomptée (nette)	148.8 GWh
Rendement	88.6%
Durée de vie de l'ouvrage	80 ans
Energie indirecte totale	672 TJ
Energie directe totale non renouvelable	0 TJ
Energie totale produite	114'300 TJ
Facteur de gain d'énergie primaire	170

L'installation éolienne du Simplon se trouve à une altitude de 2000 mètres, au col du même nom. La vitesse moyenne du vent à cet endroit est de 4,8 m/s environ. L'installation importée du Danemark avait été conçue à l'origine pour être exploitée sur les côtes maritimes. La vitesse d'enclenchement est de 4 m/s; l'installation se déclenche lorsque le vent souffle à plus de 20 m/s. La puissance nominale est de 8.5 kW et 30 kW respectivement. Cependant, l'installation fonctionne à 30 kW uniquement lorsque la vitesse du vent atteint au moins 11 m/s. Les deux rotors de 12,5 m de diamètre sont construits en résine époxy renforcée de fibres de verre. La tour a une hauteur de 22 m.



Petite installation éolienne du Simplon

Puissance	0.03 MW
Production annuelle moyenne escomptée (nette)	0.027 GWh
Durée de vie de l'ouvrage	15 ans
Energie indirecte totale	0.13 TJ
Energie directe totale non renouvelable	0 TJ
Energie totale produite	3.89 TJ
Facteur de gain d'énergie primaire	30

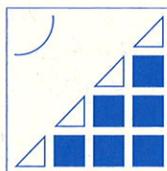
La petite installation photovoltaïque étudiée (installation typique incorporée dans une toiture inclinée) possède une puissance nominale de 3 kW, suffisante pour couvrir la consommation électrique d'une petite maison familiale. Le réseau électrique public permet de stocker l'électricité non utilisée immédiatement ou de fournir de l'électricité supplémentaire. On considère ici une installation dotée de panneaux solaires monocristallins d'une surface utile totale de 27,5 mètres carrés, posés sur un toit incliné.



Petite installation photovoltaïque (toiture inclinée)

Puissance	0.003 MW
Production annuelle moyenne escomptée (nette)	0.003 GWh
Durée de vie de l'ouvrage	30 ans
Energie indirecte totale	0.139 TJ
Energie directe totale non renouvelable	0 TJ
Energie totale produite	0.864 TJ
Facteur de gain d'énergie primaire	6.2

Le «Photovoltaïsche Alpine Kraftwerk» (PHALK; centrale photovoltaïque alpine) a été construit en 1992 au Mont Soleil, au-dessus de St-Imier dans le Jura bernois. Les modules solaires sont constitués de 10'560 plaques de stratifiés sans cadres, assemblées en 36 cellules photovoltaïques monocristallines en silice, et montées sur des supports en acier. La surface totale des cellules est de 4'576 mètres carrés. Les modules sont inclinés à 50 degrés. Le rendement net est de 12.5%.



Centrale photovoltaïque
du Mont Soleil

Puissance	0.5 MW
Production annuelle moyenne escomptée (nette)	0.678 GWh
Durée de vie de l'ouvrage	30 ans
Energie indirecte totale	68 TJ
Energie directe totale non renouvelable	0 TJ
Energie totale produite	195 TJ
Facteur de gain d'énergie primaire	2.9

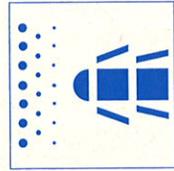
Les centrales de chauffage d'îlot (appelées aussi centrales à énergie totale équipée) sont essentiellement utilisées pour produire de la chaleur à des fins de chauffage. La source de chaleur est, ici, un moteur alimenté avec des carburants fossiles et qui fait tourner une génératrice. De la sorte, la centrale produit non seulement de la chaleur, mais encore de l'électricité. La centrale de chauffage d'îlot de Hardau a été installée en 1989 dans le complexe d'habitation urbain de Hardau (Zurich), en remplacement d'une installation de chauffage classique. Elle dessert 985 logements, deux homes pour personnes âgées, deux écoles et un jardin d'enfants par le biais d'un réseau local de chauffage à distance. L'ouvrage se compose de deux moteurs à gaz d'environ 480 kW de puissance mécanique équipés de catalyseurs à trois voies réglées. La puissance thermique de chaque moteur, c'est-à-dire la chaleur qu'il rejette, est utilisée par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. La puissance thermique maximale, y compris la pompe à chaleur installée dans la salle des machines, est de 1'830 kW. A cela, il faut ajouter une chaudière fonctionnant en régime de pointe et développant une puissance de 7 MW. Pour calculer le facteur de gain, on additionne la chaleur et l'électricité produites. Il semble que la centrale produise plus d'énergie qu'il n'en a été injecté. Cela n'est pas un effet réel mais simplement une conséquence de la valorisation de l'électricité en tant qu'énergie primaire, valorisation qui repose sur une installation moyenne.



Centrale de chauffage d'îlot de Hardau

Puissance électrique	0.9 MW
thermique	8.8 MW
Production annuelle moyenne escomptée (nette)	4.5 GWh
Production thermique annuelle moyenne	12.1 GWh
Durée de vie de l'ouvrage	30 ans
Energie indirecte totale	53 TJ
Energie directe totale non renouvelable	1'838 TJ
Energie totale produite	2'759 TJ
Facteur de gain d'énergie primaire	1.46

Dans une telle centrale, deux processus sont combinés. Tout d'abord, les fumées produites par la combustion du gaz naturel à une température de 1'000 à 1'200 degrés Celsius sont conduites dans une turbine à gaz. Lorsqu'elles sortent de celle-ci, les effluents sont encore suffisamment chauds (plus de 500 degrés Celsius) pour que l'on puisse les utiliser pour produire de la vapeur d'eau afin de faire tourner une turbine à vapeur. Enchaînés l'un à l'autre, ces deux procédés ont un très bon rendement: alors que celui d'une turbine à gaz seule varie entre 25 et 35 %, la combinaison d'une turbine à gaz et d'une turbine à vapeur présente un rendement oscillant entre 45 et 55 %. Pour calculer le facteur de gain, on a pris un aménagement allemand typique, d'une puissance de 200 MW et d'un rendement de 47 %. L'alimentation en gaz répond aux conditions appliquées dans le réseau gazier suisse à haute pression. Il semble que la centrale produise plus d'énergie qu'il n'en a été injecté. Cela n'est pas un effet réel mais simplement une conséquence de la valorisation de l'électricité en tant qu'énergie primaire, valorisation qui repose sur une installation moyenne.



Centrale à turbine à gaz et à vapeur

Puissance	200 MW
Production annuelle moyenne escomptée (nette)	1'314 GWh
Durée de vie de l'ouvrage	20 ans
Energie indirecte totale	3'672 TJ
Energie directe totale non renouvelable	201'300 TJ
Energie totale produite	252'300 TJ
Facteur de gain d'énergie primaire	1.23

La centrale de Chavalon, au-dessus de Vouvry, est la seule centrale oléothermique de Suisse. Elle fonctionne à l'huile lourde produite à la raffinerie de Collombey, près de Monthey. D'une puissance de 300 MW, elle sert exclusivement d'appoint. Son rendement est de 37%. Pour calculer son facteur de gain, on a admis une durée d'utilisation effective de 5'700 heures, caractéristique des conditions européennes (à l'heure actuelle, elle fonctionne effectivement durant 2'100 heures par année). Par ailleurs, on a tenu compte d'un dispositif d'absorption par aspersion afin d'éliminer le soufre contenu dans les effluents gazeux, et mis en oeuvre un certain nombre de mesures en vue de réduire la concentration des oxydes d'azote dans les fumées et de dépoussiérer celles-ci.



Centrale oléothermique

Puissance	300 MW
Production annuelle moyenne escomptée (nette)	1'710 GWh
Durée de vie de l'ouvrage	30 ans
Energie indirecte totale	35'800 TJ
Energie directe totale non renouvelable	496'700 TJ
Energie totale produite	492'500 TJ
Facteur de gain d'énergie primaire	0.92

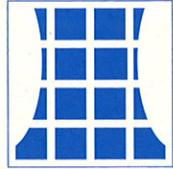
Pour la centrale à charbon, les données techniques énumérées ici ne se rapportent pas à une installation réelle, mais correspondent à celles d'une unité de production allemande typique. La puissance nette admise est de 500 MW, la durée de fonctionnement annuelle, de 4'000 heures et le rendement, de 36,5%. L'ouvrage est équipé de filtres électriques et d'un dispositif de désulfuration des fumées ainsi que d'un système de dénitruration.



Centrale à charbon

Puissance	500 MW
Production annuelle moyenne escomptée (nette)	2'000 GWh
Durée de vie de l'ouvrage	37.5 ans
Energie indirecte totale	83'900 TJ
Energie directe totale non renouvelable	739'800 TJ
Energie totale produite	720'000 TJ
Facteur de gain d'énergie primaire	0.87

La centrale nucléaire de Leibstadt (CNL) est entrée en service en 1984; elle se situe à peu près à mi-distance entre Schaffhouse et Bâle. Sa puissance est de 990 MW. Son refroidissement est assuré par une tour de 144 m de haut, l'eau de refroidissement étant prélevée dans le Rhin voisin. La centrale de Leibstadt fait partie de la filière des réacteurs à eau légère, dans lesquels l'eau normale est utilisée comme modérateur et comme caloporteur. Lorsqu'elle traverse le coeur du réacteur, cette eau atteint une température de 300 degrés Celsius et se met à bouillir (d'où le nom de réacteur à eau bouillante). La vapeur ainsi produite (environ 1.6 tonne par seconde) alimente la turbine à vapeur.



Réacteur à eau bouillante
de Leibstadt

Puissance	990 MW
Production annuelle moyenne escomptée (nette)	7'288 GWh
Durée de vie de l'ouvrage	40 ans
Energie indirecte totale	118'700 TJ
Energie directe totale non renouvelable	3'331'000 TJ
Energie totale produite	2'802'000 TJ
Facteur de gain d'énergie primaire*	0.81

