Les petites centrales hydroélectriques

Autor(en): **[s.n.]**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 16

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904998

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Les petites centrales hydroélectriques[1])

Par le Groupe d'experts des microcentrales[2])

Nach einem kurzen geschichtlichen Abriss werden die Gründe dargelegt, aus welchen das Interesse an Kleinwasserkraftwerken wieder erwacht ist. Eine Unterscheidung zwischen Klein-, Mini- und Mikrokraftwerken wird vorgeschlagen, entsprechend ihren Nennleistungen. Dann werden Angaben über die Bewertung des nutzbaren Potentials in Europa und anderswo auf der Welt gemacht. Danach wird zu Umweltfragen übergegangen, und es werden einige Lösungsmethoden beschrieben. Schliesslich wird eine Einteilung solcher Anlagen präsentiert, die insbesondere auf der Lastcharakteristik, der Engpassleistung und dem Kraftwerktyp beruht.

Après un bref rappel historique et un court exposé des raisons du regain d'intérêt pour les petits aménagements hydroélectriques, il est proposé une distinction entre les petites, mini- et micro-centrales sur base de leur puissance nominale, avant de donner des indications sur l'évaluation du potentiel aménageable en Europe et ailleurs dans le monde. Ensuite, on passe aux questions d'environnement et on décrit quelques moyens pour les surmonter. Puis, il est présenté une classification de ce genre d'installation basée, notamment, sur les caractéristiques de charge, le débit d'équipement et le type d'unité.

1. Introduction

1.1. Historique

L'eau est non seulement le constituant principal de tout être vivant, mais aide aussi l'homme, depuis les temps anciens, à satisfaire ses besoins d'énergie.

Bien qu'avant l'ère chrétienne, l'homme avait déjà inventé des dispositifs tels que «tympan», la vis d'Archimède ou la «noria» orientale, qui utilisent l'énergie cinétique de l'eau pour alimenter des canaux d'irrigation.

Au premier siècle avant notre ère et pendant l'empire romain, l'eau était utilisée pour faire tourner des roues à aubes. Au début du Moyen Age, on se servait de roues à augets pour exploiter les chutes d'eau. A cette même époque, on utilisait également des roues horizontales. Toutes ces roues étaient destinées à de nombreux usages. Elles servaient à moudre le grain, à marteler, à scier, à polir les armures, à drainer les mines, etc.

Au XIXe siècle, à l'aube de l'ère industrielle, les usines étaient implantées à proximité de chutes ou de rapides pour entraîner les machines avec l'énergie cinétique de l'eau par l'intermédiaire d'arbres, de courroies et d'engrenages.

Dans la deuxième moitié du XIXe siècle, la turbine hydraulique fut développée pour remplacer les roues des «installations hydrodynamiques» mentionnées précédemment. Vers 1885, l'adoption de génératrices électriques transforma ces installations en centrales hydroélectriques alimentant les communautés et les industries du voisinage en électricité.

Plusieurs milliers de petites centrales hydroélectriques isolées fonctionnaient au début de notre siècle. Grâce aux progrès de la technique de transport de l'énergie, il devint possible d'exploiter des chutes situées en des lieux plus reculés et offrant une énergie potentielle supérieure, et de créer de grands réseaux interconnectés.

Le faible coût de l'énergie produite dans les grandes centrales hydroélectriques et l'abondance de pétrole bon marché pour les centrales thermiques diminuèrent l'intérêt économique des petites centrales hydroélectriques. Leur exploitation ne sembla plus souhaitable et la plupart de ces petites centrales furent fermées bien qu'il en reste encore plusieurs milliers en service.

Ce scénario est à peu près le même dans presque tous les pays industrialisés et il ne diffère que par les dates de son déroulement.

La construction de centrales hydroélectriques connut un véritable essor après la seconde guerre mondiale lorsque la plupart des pays industrialisés se mirent à exploiter en grand leur potentiel hydroélectrique. Quand la crise du pétrole s'instaura dans les années 1970, seul un petit pourcentage des sites aménageables n'était pas encore exploité.

1.2. Regain d'intérêt pour les petites centrales hydroélectriques

Les effets de la crise du pétrole continuent cependant de se faire sentir. Bien souvent, l'aménagement des derniers sites hydroélectriques potentiels suscite des réserves. De nombreux pays ont donc jugé nécessaire d'étudier le potentiel disponible pour installer de petites centrales hydroélectriques.

La reconstruction et la remise en service de centrales tombées en désuétude, la rénovation et la modernisation des petites centrales exploitées ainsi que la construction de nouvelles petites centrales hydroélectriques permettraient de fournir *globalement* une quantité d'énergie significative.

Par rapport aux grandes centrales hydroélectriques, les petites centrales offrent un certain nombre d'avantages tels qu'un impact très local sur l'environnement, le caractère moins sévère des caractéristiques géologiques requises, les brefs délais de construction, la possibilité d'alimenter des zones reculées sans de longues lignes de transport, etc. Comme toutes les centrales hydroélectriques, elles économisent les combustibles fossiles polluants et chers puisqu'elles utilisent une énergie renouvelable.

Toutefois, elles présentent aussi quelques inconvénients. Leur coût paraît souvent élevé. Des recours, même émanant de simples particuliers, contre l'aménagement d'un site peuvent prolonger à l'excès les délais d'obtention des autorisations nécessaires. Beaucoup de pays essaient donc d'accroître l'intérêt manifesté pour les petites centrales électriques en simplifiant la procédure légale ou en octroyant des subventions, par exemple.

Parallèlement à ces mesures administratives, on développe la technique afin de réduire le coût des petites centrales hydroélectriques. Les réductions de coût résultent de la normalisation et de la simplification de la conception, de la fabrication en séries d'unités standards, lorsque c'est possible, de la simplification des procédures d'autorisation de cons-

[1]) version abrégée

[2]) La composition du Groupe d'experts est la suivante: M. *S.-A. Hultin*, Président (Suède); MM. *J. Ernould* (Belgique), *J.J. Aspuru* (Espagne), *J.P. Rouyer* et *C. Le Plomb* (France), *A. Motta* (Italie), *T. Jensen* (Norvège), *P.G. Fällström* et *S. Lasu* (Suède); M. *A.D. Therianos* (Grèce).

truction et de mise en service, de la simplification de l'exploitation, etc. Bien que la normalisation porte principalement sur l'équipement électromécanique, elle retentit aussi sur les travaux de génie civil.

1.3. Qu'est-ce qu'une petite centrale hydroélectrique?

Il n'est pas possible de comparer les programmes et les statistiques relatifs aux petites centrales hydroélectriques parce qu'il n'existe pas de définition de ce terme. Il en va de même des autres termes utilisés en hydroélectricité comme minicentrale et microcentrale, par exemple.

Le mot «petite» peut se référer à la dimension de la roue ou de tout autre équipement, au montant des investissements, à la production annuelle ou, et c'est peut-être ce qui est le plus pertinent, à la puissance de la centrale par rapport à celle des autres moyens de production de la région. Ces définitions devraient cependant être complétées par des spécifications et deviendraient peu commodes.

Nous recommandons donc les définitions suivantes:

- une *petite centrale* hydroélectrique a une puissance installée inférieure à 10 000 kW;
- une *minicentrale hydroélectrique* a une puissance installée inférieure à 2000 kW;
- une *microcentrale hydroélectrique* a une puissance installée inférieure à 500 kW.

Il est naturellement possible de définir d'autres limites, mais nous espérons que ces définitions seront acceptées comme référence.

Une unité de 10 MW pour basse chute de 4 mètres ou moins, par exemple, aura de grandes dimensions. Le diamètre de la roue atteindra 7 ou 8 mètres. La turbine et ses ouvrages d'amenée et de restitution auront une influence telle sur les travaux de génie civil qu'il faudra envisager une conception particulière de l'aménagement. Ces installations n'entrent pas dans le cadre de ce rapport qui concerne les unités qui se prêtent, de par leurs dimensions, à une normalisation.

Le thème prévu pour ce rapport est l'examen des petites centrales hydroélectriques de 100 à 3000 kW. En vérité, il existe peu de données statistiques sur les centrales comprises dans cette gamme de puissance. Des enquêtes montrent qu'il existe une multitude de centrales de très petite puissance et que la production globale d'énergie est très modeste. Le *nombre* de petites centrales est donc jugé incertain. Les chiffres relatifs à leur *puissance* semblent plus fiables.

1.4. Potentiels et programmes européens

Le tableau I indique les potentiels hydroélectriques d'un certain nombre de pays européens.

1.5. Potentiels et programmes hors d'Europe

Hors d'Europe, d'autres pays manifestent aussi un grand intérêt pour les petites centrales hydroélectriques. Les pays en voie de développement s'intéressent en particulier à l'implantation de centrales dans les régions isolées et aux unités qui peuvent être fabriquées et entretenues par des ateliers locaux. Ces intérêts se heurtent souvent.

Une étude sur l'hydroélectricité nationale destinée au Congrès américain a révélé qu'environ 5400 barrages existants et 4500 nouveaux sites pouvaient être aménagés. Sur ces 10 000 sites, presque 8000 auraient une puissance inférieure ou égale à 25 MW leur potentiel total étant évalué à 24 500 MW et 76 000 GWh.

Les *Etats-Unis d'Amérique* ont encouragé le développement de petites centrales hydroélectriques et garanti un marché par la mise en place d'une législation spéciale. L'objectif est de mettre en service 1500 MW vers 1985 et 20 000 MW vers l'an 2000. Le gouvernement consent des prêts pour les études de fiabilité. Ces prêts peuvent représenter jusqu'à 90% du coût des études et de la procédure d'autorisation. Quelques avantages fiscaux sont également consentis et les tarifs d'achat de l'énergie aux producteurs sont simplifiés.

Potentiels hydroélectriques de certains pays européens — Tableau I

Pays	Production hydraulique en TWh par an			
	Exploitable			Moyenne effective annuelle [2])
	Techniquement	Economiquement	Pratiquement [1])	
Allemagne (RFA)	21	21		16,8
Autriche	62	53	50	22,7
Belgique	< 1	< 1	< 1	0,5
Espagne	70	55	50	32,4
Finlande	18	17	16	11,6
France	100	80	72	61,0
Grèce	20			2,1
Italie	62	56		46,7
Norvège		172	161	76,6
Pologne	12			1,7
Portugal	23			7,8
Royaume-Uni	7		6	5,0
Suède	130	95	65	56,0
Suisse	41	38	35	31,4
Yougoslavie	66	48		21,0

[1]) Inférieur à la limite économique à cause des problèmes d'environnement, entre autres.
[2]) Statistiques des Nations Unies, approvisionnements énergétiques mondiaux entre 1973 et 1978.

En *Chine*, on ne recense pas moins d'environ 60 000 petites centrales hydroélectriques correspondant à une puissance totale de 3000 MW. La plupart de ces centrales ont été réalisées par des fermiers, mais les ingénieurs font désormais bénéficier cette technique de la normalisation et de conceptions modernes pour que son développement puisse se poursuivre.

Un grand programme de développement de petites centrales hydroélectriques est en cours de réalisation au Népal avec une assistance étrangère. Des études de faisabilité sont entreprises aux *Philippines*. On note un intérêt tout aussi vif pour ces petites centrales au *Pakistan*, en *Inde* et en *Indonésie* ainsi qu'en *Nouvelle-Zélande* et dans la plupart des pays d'Amérique latine.

Le *Japon* fait état d'un potentiel total de 10 000 MW pour les petites centrales hydroélectriques et estime nécessaire de lancer un programme de recherche d'urgence.

2. Problèmes d'environnement

2.1. Généralités

Une fois posé le principe que chaque être humain a besoin d'une certaine quantité d'énergie au cours de son existence, on constate que cette énergie peut être produite de bien des façons. Cependant, aucune source d'énergie n'est en mesure de garantir une fourniture sûre d'électricité avec moins d'effets nuisibles sur l'environnement que l'énergie hydraulique. Celle-ci est inépuisable, ne pollue ni l'eau, ni l'air, nous rend moins tributaires des importations d'énergie, n'impose aucune charge aux générations futures, échappe quasiment à l'inflation, etc. A l'instar de toutes les applications de l'énergie hydraulique, les petites centrales hydroélectriques profitent, par nature, à la société, c'est-à-dire à l'environnement pris dans son sens large.

Aussi longtemps qu'un potentiel hydroélectrique reste inexploité, il faut produire une quantité équivalente d'électricité par des moyens qui risquent de nuire à l'environnement. Un site inexploité peut aussi être un site qui n'a pas fait l'objet d'une optimisation à buts multiples objective. Un aménagement hydroélectrique modifiera certainement l'environnement du site, mais, ce faisant, il peut améliorer la situation antérieure.

D'un autre côté, un site existant ou abandonné est le témoin des activités de nos prédécesseurs. Permettre à un tel site de se détériorer revient à endommager l'environnement. Les droits légaux qui ont été octroyés à ces vieilles installations ou qui ont été établis par la commune devraient être maintenus ou rétablis.

2.2. Effets négatifs

Les petites centrales hydroélectriques ont des effets sur l'environnement similaires à ceux des grandes installations. Cependant, ces effets sont souvent plus limités et n'ont qu'un impact local.

Bien que les réservoirs des petites centrales soient généralement plus petits et moins profonds, ils peuvent avoir, par leur nombre, des effets sur l'environnement plus importants qu'un petit nombre de grands réservoirs.

En général, le tronçon de rivière affecté par une réduction de débit à cause de la présence d'une petite centrale hydroélectrique est généralement court. Cependant, une petite centrale a moins de moyens financiers pour réduire les inconvénients de sa présence. Dans les aménagements à buts multiples, les effets nuisibles n'ont pas à être compensés uniquement par la production électrique.

2.3. Réduction des dommages

Il faut prévoir les dommages pour l'environnement. Il est donc recommandé d'effectuer une étude d'impact limitée au site ou étendue à la région en même temps que l'étude de faisabilité.

L'exploitant de la centrale peut être tenu de procéder à des compensations telles que le financement de dispositifs de franchissement pour les poissons, l'alevinage ou le stockage d'eau pour l'irrigation, par exemple. Il convient également de tenir compte d'éventuels problèmes d'approvisionnement en eau, de stockage, de protection contre les crues, d'augmentation du débit d'étiage, de réservoirs, etc.

3. Classement des petites centrales hydroélectriques

3.1. Généralités

Les petites centrales hydroélectriques peuvent être classées selon plusieurs critères. L'un d'eux, que nous avons signalé au paragraphe 1.2, a trait aux trois modes de développement actuel des petites centrales hydroélectriques, c'est-à-dire:

a) la reconstruction et la remise en service de centrales abandonnées,

b) la rénovation de vieilles centrales encore en service,

c) l'aménagement de nouveaux sites.

La puissance peut aussi servir de critère de classement. Sur cette base, on peut distinguer, comme nous l'avons fait au paragraphe 1.3, les petites centrales, les minicentrales et les microcentrales selon que leur puissance est inférieure à 10 000, 2000 ou 500 kW.

3.2. Caractéristiques de charge

La plupart des régions des pays membres de l'UNIPEDE sont maintenant raccordées aux réseaux d'électricité qui transportent une quantité d'énergie considérable par rapport aux possibilités de production des petites centrales hydroélectriques. La responsabilité de tenue à disposition d'une réserve, de réglage de la fréquence et de la tension, etc. incombe aux exploitants d'unités puissantes et on devrait logiquement être moins exigeant à l'égard des petites centrales hydroélectriques.

Quelques zones sont encore isolées. Les équipements fabriqués en Europe pour les pays en voie de développement doivent être prévus pour fonctionner sur des réseaux autonomes. Ces unités ne peuvent être guère simplifiées sauf si les usagers sont prêts à accepter une qualité médiocre de la fourniture d'énergie.

3.3. Type de service

Les centrales de petite puissance par rapport à la charge du réseau sont dispensées de participer au réglage. Elles

peuvent être simplifiées jusqu'à la suppression de toute capacité de réglage de la charge. En conséquence, chaque unité ne fonctionnera qu'à un seul niveau de charge ou bien sera arrêtée. C'est ce que l'on appelle généralement le fonctionnement intermittent ou par «tout ou rien».

Le fonctionnement par tout ou rien n'est possible que s'il existe un réservoir correctement dimensionné en amont de la centrale. Si une centrale comprend un grand nombre de groupes tout ou rien, elle pourra fonctionner comme une unité équipée d'un système de réglage du débit.

La quantité d'énergie non réglée qui peut être admise sur le réseau est cependant limitée. Ce type d'équipement ne peut donc être choisi qu'avec l'accord du distributeur d'électricité local.

3.4. Débit d'équipement

Le débit d'équipement adéquat dépend du débit, du stockage, de la charge de base ou de pointe, du réseau, etc.

Le débit moyen annuel ou *module* peut être évalué à partir de la surface du bassin versant et du débit spécifique qui est, en général, suffisamment bien connu pour les cours d'eau européens. Cependant, les variations de débit peuvent être considérables, ce qui revêt une importance particulière pour les petites centrales hydroélectriques qui ne peuvent normalement pas supporter le coût de construction d'un réservoir suffisamment grand pour retenir l'essentiel du débit annuel.

En l'absence de séries hydrologiques représentatives, on peut utiliser un modèle hydrologique pour simuler les séries de débit à partir de séries observées de précipitations et de températures. Le modèle peut être tout d'abord étalonné au moyen de données relatives aux bassins versants voisins, puis corrigé avec les données du bassin versant concerné et avec des paramètres régionalisés.

Les possibilités de stockage sont déterminées d'après les cartes et les études sur le terrain ainsi que d'après la hauteur de chute. Elles servent au calcul de la production annuelle possible. En conséquence, on peut établir le rapport entre le volume de stockage possible et le débit annuel. Le tableau II permet de classer l'usine.

La figure 1 illustre l'expérience norvégienne en matière de choix de la puissance économique des turbines, en vue d'études de préfaisabilité.

3.5. Types d'unités hydroélectriques

Les unités hydroélectriques sont classées en fonction de leur turbine, de leur génératrice et de la position de l'arbre de la turbine. L'arbre est généralement horizontal ou vertical, mais il peut être parfois préférable de l'incliner.

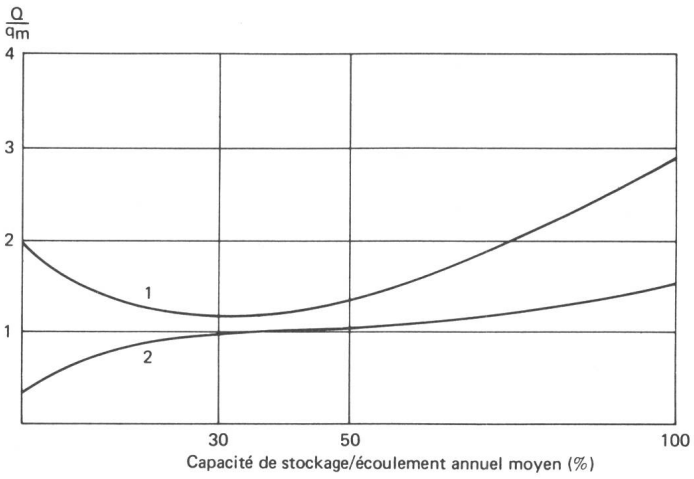

Fig. 1 Capacité à installer selon l'expérience norvégienne

1 Réseau interconnecté avec possibilité de fonctionnement par tout ou rien

2 Circuit séparé ou rivière ne permettant pas un fonctionnement par tout ou rien

q_m Débit moyen en m^3/s

Q Débit d'équipement en m^3/s

3.5.1. Turbine

Il existe deux catégories fondamentales de turbines: les turbines à réaction et les turbines à action.

Les turbines *à réaction* sont classées en fonction du sens d'écoulement de l'eau à travers la roue. Les turbines de type Francis, utilisées pour des chutes de 8 à 500 m, sont équipées d'une roue à entrée radiale et à sortie axiale. Les turbines du type hélice sont munies d'une roue à entrée et sortie axiales dont les pales peuvent être fixes ou réglables. Elles sont montées dans de petites machines standards pour équiper des chutes inférieures à une trentaine de mètres.

Les turbines Francis et les turbines hélice sont dotées d'un distributeur qui guide l'eau sur la roue. Les directrices du distributeur peuvent être fixes ou mobiles. Les turbines hélice à distributeur mobile et pales de roue réglables sont du type Kaplan. Les turbines hélice à distributeur fixe et pales de roue réglables sont parfois appelées «turbines semi-Kaplan».

Les pompes centrifuges ou à hélice de fabrication standard qui tournent à contre-courant peuvent servir de turbines à réaction. Quelques modifications sont nécessaires pour améliorer leurs performances, mais le prix de la machine reste peu élevé, tout comme leur rendement, il est vrai.

Tableau II

Rapport stockage/débit annuel	Commentaires
Petit	Un bassin en amont de l'usine permet d'utiliser des machines fonctionnant par tout ou rien. Deux groupes ou plus peuvent accroître la production.
Moyen	L'eau peut être stockée et utilisée en fonction des besoins. Situation comparable à une rivière sans fortes variations de débit.
Grand	Parfait pour fonctionner en pointe ou pour alimenter un réseau séparé.

Les turbines *à action* transforment l'énergie de la chute en énergie cinétique avant que l'eau n'atteigne la roue qui se trouve normalement à la pression atmosphérique. Les deux types principaux de turbines à action sont la turbine Pelton et la turbine à double action.

Les turbines Pelton peuvent être conçues pour de très hautes chutes, mais leur domaine s'étend de 60 à 1100 m lorsqu'elles équipent de petites centrales. Une partie de la chute est perdue parce que la roue doit se trouver normalement au-dessus des plus hautes eaux aval.

Les turbines à double action sont destinées à des chutes comprises entre 3 et 200 m.

Les turbines à écoulement axial ont un *débit spécifique*, c'est-à-dire un débit par m^2 de roue, plus grand que celui des turbines Francis qui est lui-même supérieur à celui des turbines à action.

La figure 2 indique le domaine d'utilisation normal des différents types de turbines standards équipant de petites centrales. On trouve plusieurs constructeurs de ces types de turbines en Europe, notamment pour l'équipement des basses chutes. Le prix au kW est cependant très élevé par rapport à celui des turbines pour moyennes et hautes chutes et des grandes turbines (voir figure 5, par exemple).

La figure 3 indique le rendement moyen de quelques types de turbines. Les valeurs de rendement sont inférieures pour les turbines à action de basse chute. Les pertes dans le multiplicateur réduisent le rendement de l'unité et, si ces pertes étaient déduites du rendement de la turbine, les courbes devraient être réduites en conséquence.

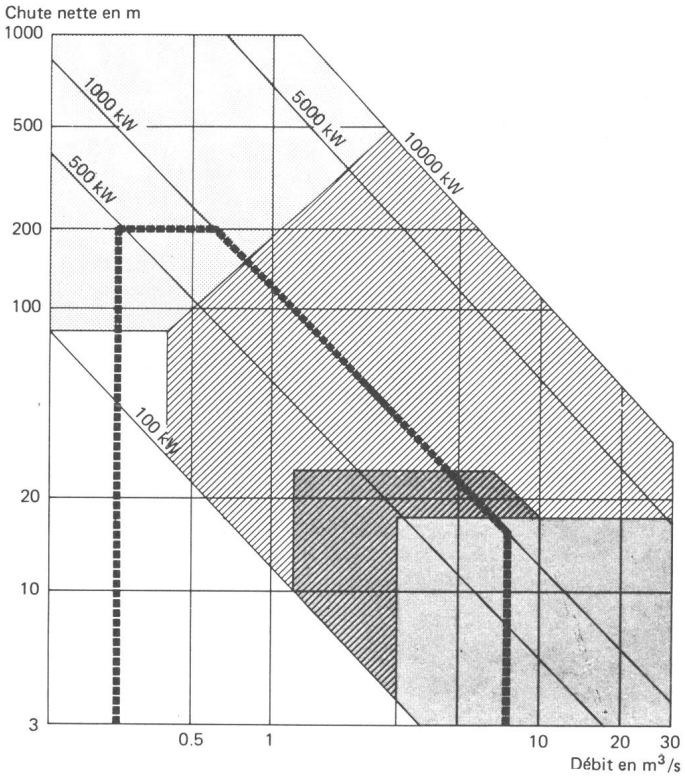

Fig. 2 Domaines d'utilisation normaux des petites turbines hydroélectriques standards

Pelton
Francis
Ecoulement axial
Double action

3.5.2 *Génératrice*

Le coût des génératrices augmente rapidement avec le nombre de pôles, c'est-à-dire de façon inversement proportionnelle à la vitesse de rotation. Pour les équipements de basse chute, la vitesse de rotation de la turbine sera souvent choisie de façon que l'installation d'un multiplicateur destiné à augmenter la vitesse de rotation de la génératrice soit avantageuse. Les multiplicateurs actuels sont conçus pour des couples considérables dépassant largement les limites des petits équipements hydroélectriques.

Les génératrices peuvent être synchrones ou asynchrones. La génératrice synchrone convient mieux pour fonctionner séparément ou en parallèle, mais elle nécessite un dispositif de synchronisation et peut devenir onéreuse. La génératrice asynchrone à induction est plus simple et moins chère que la génératrice synchrone. Elle se prête bien à un fonctionnement en parallèle et peut aussi être utilisée, à charge quasi constante, pour un fonctionnement séparé.

3.5.3. *Nombre d'unités*

On admet généralement que pour une puissance totale donnée, le coût augmente avec le nombre d'unités. Ce n'est pas toujours vrai pour les petites centrales hydroélectriques équipées d'unités standards.

Il y a plusieurs raisons à cela. Tout d'abord, la fabrication de plusieurs unités standards de même taille procurera les avantages de la fabrication en série en usine. Ensuite, plusieurs machines bon marché fonctionnant par tout ou rien peuvent assurer un nombre tel de points de fonctionnement à rendement élevé qu'il devient inutile d'acuérir une turbine plus complexe comme une turbine Kaplan à double régulation, par exemple.

Phénomène commun aux petites et aux grandes centrales, une centrale équipée de plusieurs machines sera moins vulnérable parce qu'une panne n'entraînera proba-

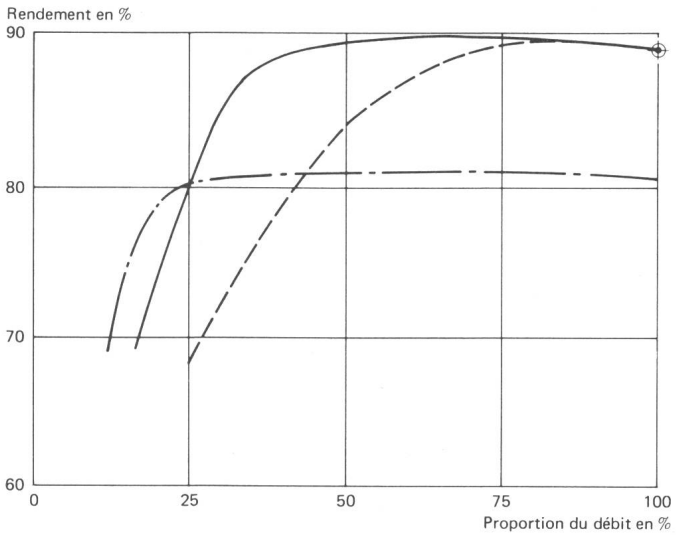

Fig. 3 Rendement (abstraction faite des pertes dans le multiplicateur et la génératrice)

——— Ecoulement axial, turbine à double régulation (Kaplan)
- - - - - - Ecoulement axial, turbine à pales réglables
⊕ Ecoulement axial, turbine fonctionnant par tout ou rien
—·— Turbine à double action

Quelques exemples d'expériences norvégiennes de projets souterrains. 5 Nkr. ≃ 1 $US.

Tableau III

	Coût moyen 1979 Nkr./m	Section en m²		Nombre de Manning (ou de Strickler)	Influence moyenne sur la roche
		Minimum	Maximum		
Tunnel					
Abattage à l'explosif	3200	5–8		28–35	L'abattage à l'explosif engendre des ondes de choc dans la roche. Il peut entraîner plus d'ancrages. La roche peut servir de matériau de remplissage pour la couche de base de routes ou pour la construction de barrages.
Forage à pleine section L = 3000 m	2800	4	4	70	Faibles vibrations dans la roche. Production de poussières inutilisables pour la couche de base de routes ou pour la construction de barrages. Possibilité d'utilisation en combinaison avec d'autres matériaux.
Galerie:					
Abattage à l'explosif (Alimak)	6000	3,5–4		30–35	Comme pour le tunnel.
Forage	3700		1,1	70–80	Doit être accessible de la base au sommet.

blement que la perte d'une partie de la production. En outre, il est plus facile d'envoyer chaque machine à un atelier de réparation centralisé.

Une centrale peut être divisée en plusieurs unités pour pouvoir utiliser des conduits plus légers et réduire ainsi les coûts de transport, par exemple.

3.6. *Hauteurs de chute, conduits hydrauliques, etc.*

Les centrales hydroélectriques sont souvent qualifiées de «basse chute», «moyenne chute» ou «haute chute». Ces catégories ne correspondent pas à des définitions strictes. De façon pratique, on peut dire que dans les centrales de basse chute, la prise d'eau et le groupe forment généralement un ensemble alors que pour les centrales de haute (ou moyenne) chute, une conduite forcée d'une certaine longueur sépare la prise d'eau et le groupe.

Les centrales hydroélectriques peuvent aussi être classées selon des critères de génie civil. Le classement le plus courant consiste à distinguer les centrales extérieures et les centrales souterraines. Presque toutes les petites centrales hydroélectriques sont extérieures.

Les tableaux III et IV donnent des informations sur les conduites forcées fabriquées à partir de divers matériaux.

Quelques exemples d'expériences norvégiennes de projets de surface.

Tableau IV

Conduite forcée	Bois	Plastique renforcé	Acier	Fonte	Tuyauterie en béton
Diamètre max. en m	4	2,0	5–6	1,2	0,5–2
Pression max. en mCE	65	160	1000	400	150
Frottement	$f = 0{,}015$	$f = 0{,}014$	$f = 0{,}020$	$f = 0{,}017$	$f = 0{,}02$
Autres points	Les conduites de bois peuvent être transportées en ... Possibilité de production locale. Pose facile. Entretien nécessaire. Intéressant pour basses chutes et forts débits. Le frottement varie peu dans le temps.	Fabrication dans des usines spéciales. Influence de l'ensoleillement, peut-être enterré. Surcroissance minime. Peu d'entretien. Peu utilisé dans des aménagements hydro-électriques jusqu'à présent.	Rarement enterré. Risque de corrosion à long terme. Entretien nécessaire. Le frottement augmente avec la corrosion.	Peut être enterrée. Transport lourd. Ne rouille pas.	Enterrée. Transport lourd. Utile pour le franchissement de routes et de zones agricoles.

4. Ouvrages de génie civil et équipement électromécanique

4.1. Généralités

Les paramètres sur lesquels se fondent les estimations de coût (taux d'intérêt, coût de la main-d'œuvre, prix de l'énergie, etc.) influent eux aussi sur la conception technique. Il est donc tout naturel que les problèmes de génie civil et d'électromécanique diffèrent d'un pays à l'autre. Néanmoins, les installations présentent une similitude de conception remarquable.

Bien souvent, les coûts d'investissement des petites centrales hydroélectriques paraissent si élevés qu'ils constituent des obstacles majeurs à la multiplication de ces installations. La figure 4 indique les tendances d'évolution des coûts des centrales en *Norvège* et la figure 5 donne les courbes similaires pour les équipements du programme de normalisation suédois. Même si l'on ne s'attarde pas sur les chiffres absolus figurant sur ces diagrammes, on constate qu'ils mettent clairement en évidence la tendance des petites centrales, notamment celles équipant les basses chutes, à devenir plus chères.

Bien avant la crise du pétrole, quelques tentatives avaient été faites pour concevoir des groupes adaptés à ces petites centrales de basse chute - programme français de «microcentrales» des années 50, par exemple. Elles procurèrent des expériences précieuses, non seulement pour les petites centrales, mais aussi pour les gros groupes bulbes actuels. Les efforts ayant été concentrés sur les centrales de basse chute, c'est là que les résultats les plus spectaculaires ont été enregistrés.

Un examen plus systématique des petites centrales hydroélectriques a été effectué au cours des années 70. Les statistiques concernant les hauteurs de chute, les débits, les réseaux de distribution, etc., ont servi de base pour définir les programmes de normalisation. On s'est employé à trouver des solutions techniques pour les trois principaux objectifs définis, c'est-à-dire la reconstruction de centrales abandonnées, la modernisation et l'agrandissement de vieilles centrales et la construction de nouvelles petites centrales.

Il est souvent possible de réutiliser l'essentiel des constructions existantes lorsque de vieilles centrales ont besoin d'être rénovées. Ces structures existantes peuvent imposer des restrictions qui empêchent le choix objectif d'une puissance maximale, par exemple. D'un autre côté, le coût de l'aménagement peut être évalué beaucoup plus sûrement que si d'importants travaux de génie civil étaient nécessaires. Le coût de l'équipement électromécanique peut représenter l'essentiel du coût global.

Les coûts d'exploitation sont réduits grâce à l'automatisation et à la télécommande et les coûts d'entretien grâce à l'emploi d'équipements simplifiés, par exemple.

Dans le passé, les petites usines étaient conçues comme des modèles réduits de grandes centrales. Les exigences actuelles de rentabilité et les problèmes de financement contraignent les concepteurs à rechercher de nouvelles solutions.

4.2. Tendances des choix techniques

4.2.1. Ouvrages de génie civil

La conception des ouvrages de génie civil dépend presque totalement des caractéristiques du site. Elle est aussi fonction du choix de l'équipement hydroélectrique.

Les barrages sont généralement bas. Lorsque leur longueur de crête le permet, il est préférable de les protéger par une simple crête déversante plutôt que par un évacuateur de crues qui nécessite un vannage.

Les prises d'eau doivent être normalement pourvues de grilles pour protéger les machines des détritus et des morceaux de glace. En raison du faible écartement des barreaux des grilles, il est souvent nécessaire de nettoyer les grilles

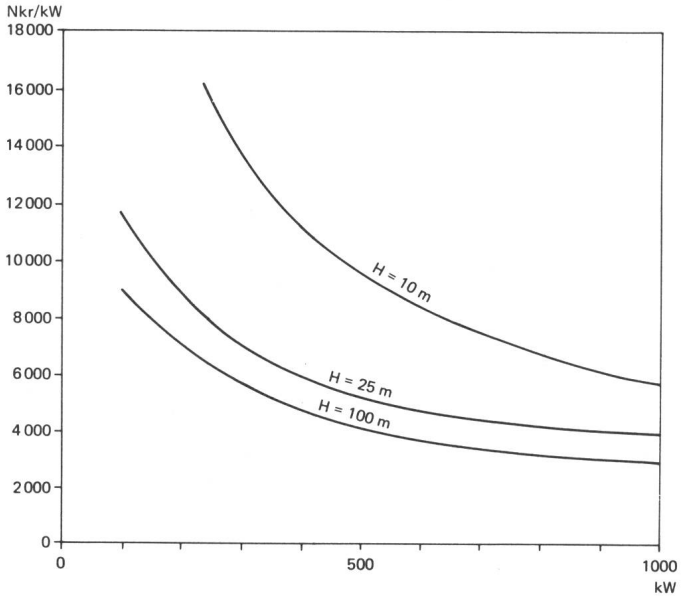

Fig. 4 Coût moyen d'une petite centrale hydroélectrique en Norvège, y compris construction des bâtiments, turbines, génératrice, etc. Base de prix de janvier 1980 (1 $US coûtait alors environ 5 cr. n.)

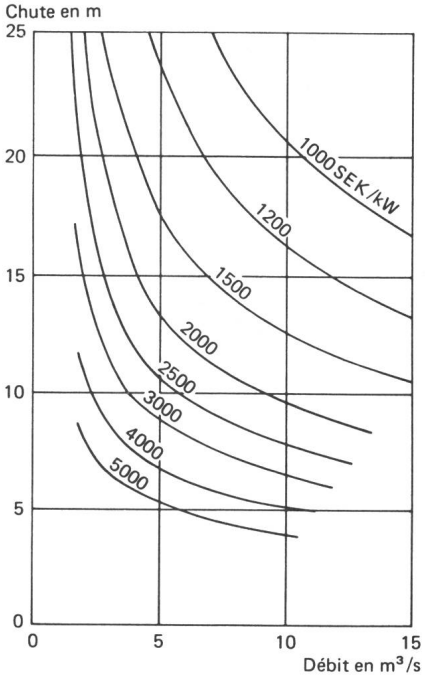

Fig. 5 Coût spécifique (cr. s./kW) de l'équipement mécanique et électrique complet d'unités des séries standards suédoises avec pales de roue fixes. Base de prix: janvier 1979 (1 $US valait alors environ 4,5 cr. s.)

fréquemment, tout au moins à certaines saisons. Des dégrilleurs automatiques sont donc couramment utilisés.

Un dispositif original a été mis au point en *France*. Les détritus sont amenés au pied de la grille où ils sont évacués par un courant transversal qui les rejette en aval (voir figure 6).

Lorsque plusieurs centrales sont exploitées en cascade, il semble judicieux d'éliminer les détritus plutôt que de les rejeter en aval, mais cela peut défavoriser la première centrale qui a à supporter les coûts du nettoyage.

Etant donné que la plupart des centrales équipent des basses chutes, l'ouvrage d'amenée n'est généralement pas une galerie en charge, mais un canal et/ou une conduite forcée. Les tableaux III et IV donnent quelques informations sur les expériences de la *Norvège*.

Les salles de machines sont habituellement au-dessus du travail naturel. Lorsque les variations du niveau d'eau aval le permettent, l'équipement est généralement choisi de façon à pouvoir être installé au-dessus des plus hautes eaux aval. Cela facilite la construction et l'entretien, mais limite les possibilités d'utilisation de turbines puissantes.

4.2.2. Equipement électromécanique

Un petit nombre de pays disposent de sites leur permettant d'installer beaucoup de petites centrales pour chutes de plusieurs centaines de mètres, mais les centrales de basse chute prédominent dans la plupart des pays. Il est donc naturel que les premiers efforts de normalisation aient porté sur les chutes comprises entre environ 3 et 30 m.

Le coût spécifique de l'équipement électromécanique, qui comprend la turbine, la génératrice, le vannage et l'appareillage électrique, augmente très vite en fonction de l'abaissement de la hauteur de chute (voir figure 5).

L'équipement doit être choisi en tenant compte de l'économie globale de la centrale, c'est-à-dire non seulement du coût de l'équipement lui-même, mais aussi de l'impact du coût des ouvrages de génie civil, des coûts d'exploitation et d'entretien ainsi que de la fiabilité et du rendement de la centrale.

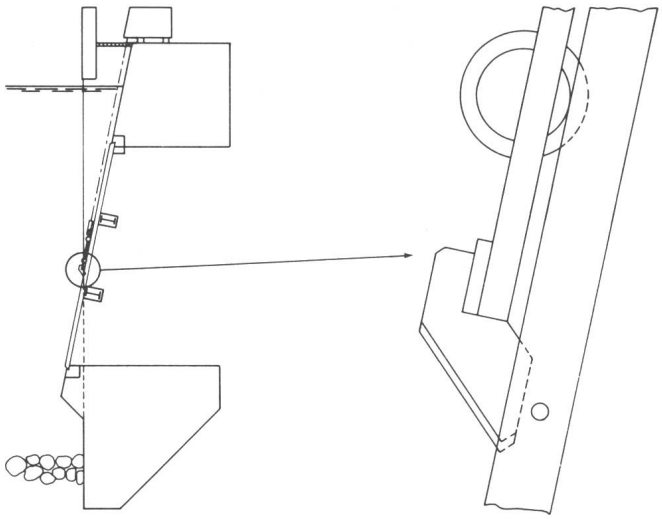

Fig. 6 Dégrilleur français

Un critère essentiel du choix de l'équipement électromécanique est le mode d'exploitation requis de la centrale. Si la centrale doit être capable à elle seule d'alimenter un réseau séparé ou une charge unique, les possibilités de simplification seront relativement limitées. La centrale devra être équipée à peu près de la même manière qu'une grande centrale hydroélectrique classique, c'est-à-dire qu'elle devra être pourvue de dispositifs de réglage de la puissance, de la fréquence et de la tension. En revanche, si la centrale n'est considérée que comme une unité d'appoint destinée à réduire la production des autres centrales, les possibilités de simplification seront bien plus grandes. L'appareillage de réglage ne sera plus nécessaire. Les coûts d'installation, d'exploitation et d'entretien seront donc considérablement réduits par rapport à une centrale hydroélectrique classique.

4.2.2.1. Turbine

Pour équiper les basses chutes, le choix se portera normalement sur les turbines à écoulement axial parce qu'elles sont plus compactes que les autres types de turbine. En outre, elles simplifieront souvent l'aménagement et le génie civil.

D'un point de vue strictement technique, un groupe Kaplan complet constituerait alors le meilleur choix. Il a un bon rendement dans la plus grande partie de la plage de débit grâce aux possibilités de réglage des directrices du distributeur et des pales de la roue, son coût d'installation peut être réduit si l'on opte pour un modèle où seules les pales de

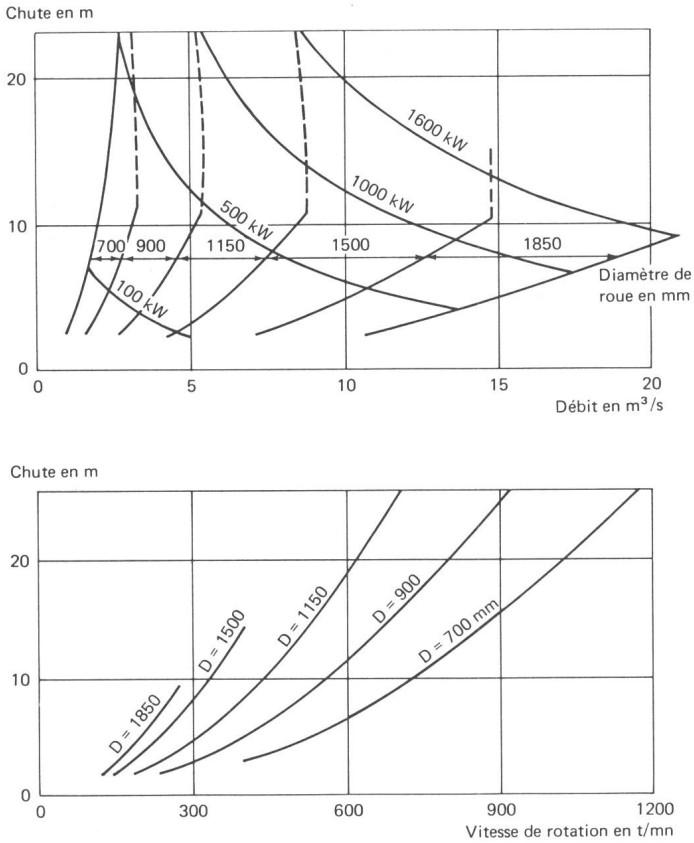

Fig. 7 Relations entre la chute, le débit, la puissance, le diamètre de roue et la vitesse de rotation de la turbine pour les machines standards suédoises

la roue sont réglables, mais cette option se solde par une légère diminution de la courbe de rendement (voir figure 3). Le choix de pales fixes entraîne une nouvelle réduction de coût.

Ainsi équipée de directrices et de pales fixes, la turbine devient une turbine hélice qui peut soit fonctionner à pleine charge avec un bon rendement, soit être arrêtée. Elle fonctionne donc uniquement par tout ou rien. Une des conditions d'utilisation de ce type de turbine est la possibilité d'accumuler de l'eau dans le réservoir de la centrale. Un mode typique d'exploitation de la centrale consiste à alterner les périodes de fonctionnement et d'arrêt. La centrale est arrêtée pendant quelques heures pour le remplissage du réservoir, puis fonctionne jusqu'à ce que le niveau d'eau du réservoir atteigne sa limite inférieure. Naturellement, ce mode d'exploitation ne peut pas être autorisé sur tous les sites. Une turbine à distributeur fixe et pales mobiles peut alors être un bon compromis.

Suivant les caractéristiques du site, la turbine sera à axe vertical, horizontal ou incliné. L'important est de caler la turbine par rapport au niveau aval.

La normalisation porte sur plusieurs dimensions. La figure 7 donne les relations existant entre la hauteur de chute, le diamètre de roue, la puissance et la vitesse de rotation pour quelques turbines du programme de normalisation suédois.

Pour les hauteurs de chute supérieures, il faudra utiliser des turbines Francis ou des turbines à action. Les options de réglage du débit seront similaires à celles des turbines axiales. Les turbines Pelton peuvent fonctionner par tout ou rien avec un ou plusieurs jets pour assurer plusieurs points de fonctionnement. Les turbines Francis peuvent être équipées d'un distributeur réglable pour un petit nombre de valeurs discrètes. Seules les turbines Pelton et les pompes multiétages modifiées conviennent pour les hautes chutes.

4.2.2.2. Génératrice et multiplicateur

Les grandes centrales hydroélectriques sont normalement équipées de génératrices synchrones qui sont le plus souvent couplées directement, c'est-à-dire qu'aucun multiplicateur n'est intercalé entre la turbine et la génératrice. La vitesse de rotation optimale de la turbine détermine le nombre de pôles de la génératrice qui est spécialement conçue en fonction de la turbine.

Des génératrices standards peuvent être utilisées dans les petites centrales hydroélectriques. La figure 7 montre combien la vitesse de rotation des turbines de basse chute peut être lente. Les génératrices à régime lent sont très encombrantes, donc onéreuses et rarement disponibles en stock. L'acroissement de la vitesse de la génératrice permet fréquemment de réaliser des économies considérables.

On répugne souvent à utiliser des multiplicateurs. Pourtant, choisis avec soin et en fonction d'exigences précises de fiabilité et de durée de vie, les multiplicateurs modernes causeront peu de soucis. Ils entraînent des pertes de rendement – pas plus de 1 à 2 % normalement à la puissance nominale – mais ces pertes sont partiellement compensées par la diminution des pertes de la génératrice et par l'utilisation de la turbine à une vitesse qui ne correspond pas à la fréquence du réseau et au nombre de pôles de la génératrice.

Lorsqu'une petite centrale hydroélectrique doit être capable d'alimenter un réseau à elle seule, elle est généralement équipée d'une génératrice synchrone. Dans les autres cas, on peut utiliser des machines asynchrones moins chères, mais il faut parfois les compléter par une batterie de condensateurs pour s'assurer que le coefficient de puissance est suffisant et que la tension de la génératrice ne sera pas trop basse.

Les machines asynchrones standards sont utilisées normalement comme moteurs. Elles ne sont pas conçues pour résister à une vitesse très élevée qui peut atteindre le double de la vitesse nominale lors de l'emballement de la turbine. Il faut donc modifier et renforcer quelque peu le rotor des machines asynchrones normales. Une solution peut consister à monter entre l'arbre de la turbine et l'arbre de la génératrice des embrayages permettant de découpler les arbres à une survitesse déterminée.

Nationale und internationale Organisationen
Organisations nationales et internationales

VSE UCS

Office d'électricité de la Suisse romande

Das OFEL, Office d'électricité de la Suisse romande, hat im Juni in Siders seine Generalversammlung abgehalten. Im offiziellen Teil sprach Präsident René Wintz, stellvertretender Direktor der Compagnie Vaudoise d'Electricité, über aktuelle Probleme der Elektrizitätswirtschaft.

Er wies insbesondere darauf hin, dass im vergangenen Jahr der Verbrauch an elektrischer Energie wiederum zugenommen hat, diesmal um 2,7%. Im Winterhalbjahr 1981/82 belief sich die Zu-

L'Office d'électricité de la Suisse romande

L'OFEL, Office d'électricité de la Suisse romande, a tenu en juin son assemblée générale à Sierre. Lors de la partie officielle, le président, M. René Wintz, sous-directeur à la Compagnie vaudoise d'électricité, parla des problèmes actuels de l'économie électrique.

Il précisa notamment «qu'au cours de l'année écoulée, la consommation d'énergie électrique s'est à nouveau accrue, l'augmentation ayant atteint 2,7%. En ce qui concerne le semestre d'hiver 1981/82, elle s'est élevée à 2,6%.