Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 93 (2002)

Heft: 2

Artikel: Potentiel hydroélectrique de l'arc alpin

Autor: Schliess, Anton

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855372

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Potentiel hydroélectrique de l'arc alpin

Les réserves les plus importantes de ressources en eau en Europe occidentale se trouvent dans les pays de l'arc alpin. Dans cette région se situe alors un potentiel hydraulique considérable. Environ les trois quarts du potentiel total de 272 TWh/a techniquement réalisable sont déjà utilisés par les six pays de l'arc alpin, à savoir par l'Allemagne, l'Autriche, la France, l'Italie, la Slovénie et la Suisse. Les réserves en énergie hydraulique et renouvelable restent néanmoins appréciables et se situent entre 33 000 GWh/a (économiquement réalisables) et 64 000 GWh/a (techniquement réalisables) pour une puissance installée de 10 000 à 20 000 MW. Ces réserves correspondent à 6–11% de la production actuelle de toutes les centrales en Europe et à 6–12% de leur puissance totale. Cette potentielle contribution future paraît faible, mais il faut souligner qu'il s'agit essentiellement d'énergie réglable, capable de couvrir les demandes d'énergie de pointe en Europe. La décision de lancer la réalisation de quelques projets économiquement intéressants et écologiquement justifiables se fait attendre en raison d'une faible croissance de la demande actuelle d'énergie électrique en Europe et de la libéralisation du marché d'électricité en cours. Toutefois, l'arc alpin fournissant de l'énergie de haute qualité et en même temps écologique et durable, jouera un rôle majeur dans l'approvisionnement futur et fiable du réseau électrique européen étendu vers les pays de l'Est.

■ Anton Schleiss

Introduction

L'arc alpin dispose des ressources en eau les plus importantes de l'Europe occidentale et par conséquent d'un potentiel hydroélectrique considérable. La plupart des grands fleuves européens tels que le Rhin, le Rhône, le Danube et le Pô sont alimentés par les cours d'eau de l'arc alpin qui s'étend de la France jusqu'à la Slovénie, en passant par la Suisse, l'Allemagne, l'Autriche et l'Italie (Figure 1). Grâce à la topographie favorable et aux eaux abondantes, ces pays jouent un rôle primordial dans l'approvisionnement en eau et en énergie renouvelable de l'Europe de l'Ouest.

Pilier de la production d'électricité de l'Autriche et de la Suisse, la force hydraulique est-elle effectivement totalement exploitée dans tout l'arc alpin? La discussion de la situation de chacun des six pays de l'arc alpin permettra de démontrer l'importance de l'hydroélectricité en tant qu'énergie renouvelable et réglable pour l'Europe. La suite de l'article aborde les perspectives d'avenir en discutant les possibilités d'augmentation de la production d'électricité par l'implantation de nouvelles installations et par l'augmentation de la puissance grâce à la modernisation et au rééquipement des ouvrages existants. La réalisation de tous ces projets dans le contexte d'un marché d'électricité libéralisé dépend avant tout de la structure des dépenses dans le secteur d'hydroélectricité. Cette structure doit être comparée à d'autres filières de

Figure 1 Pays de l'arc alpin et les grands fleuves de l'Europe (la Principauté de Monaco et le Liechtenstein ne sont pas marqués).

Adresse de l'auteur
Prof. Dr *Anton Schleiss*
Laboratoire de constructions hydrauliques
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
EPFL-LCH
CH-1015 Lausanne
E-mail: secretariat.lch@epfl.ch
Internet: http://lchwww.epfl.ch

Pays	Potentiel technique (GWh/a)	Potentiel économique (GWh/a)	Puissance installée (MW)	Production annuelle moyenne (GWh/a)	Utilisation du potentiel technique (%)	Production d'électricité fournie par l'hydroélectricité 1999 (%)
Allemagne	25 000	20 000	4 331	16 000	64	3,8
Autriche	56 000	53 700	11 500	37 500	69	65,0
France	72 000	71 500	25 200	69 800	97	15,0
Italie	69 000	54 000	15 267	46 230	67	19,4
Slovénie	8 800	6 125	846	3 700	42	29,6
Suisse	41 000	35 500	13 229	34 508	83	56,3
Pays alpins	271 800	240 825	70 373	207 738	76	16,3
Europe (sans Russie et Turquie)	1 225 000	775 000	173 200	567 000	46	15,5

Tableau I Hydroélectricité dans les pays alpins et en Europe (selon Hydropower & Dams, World Atlas 2001).

production d'électricité. Afin que la concurrence soit équitable entre ces secteurs, il est nécessaire de prendre en compte tous les effets secondaires, négatifs ou positifs, internes et externes, engendrés par la production de diverses sources d'énergie électrique.

La contribution des aménagements hydroélectriques au développement durable est incontestable. L'arc alpin dispose à cet égard d'un potentiel enviable qui doit être utilisé dans le cadre des efforts visant à réduire des émissions de gaz à effet de serre.

Situation actuelle

Allemagne

En Allemagne, l'énergie hydraulique ne constitue qu'environ 4% de la production totale d'électricité [1]. La production moyenne escomptée de toutes les centrales hydroélectriques est de 16 000 GWh/a (la production en 1998 était de 17 200 GWh) avec une puissance installée de 4331 MW, sans compter les installations de pompage-turbinage (Tableau I) [1].

L'hydraulique a une grande importance pour le Land de Bavière qui fournit environ les deux tiers de la production totale de l'Allemagne. En Bavière, presque 18% de la consommation électrique sont couverts par environ 4200 centrales hydroélectriques dont 100 ont une puissance supérieure à 500 kW [3]. De plus, l'énergie hydraulique produite par les centrales bavaroises couvre 8% des besoins du Land de Bade-Wurtemberg [2]. Avec une puissance installée de 720 MW, ces centrales peuvent produire 3900 GWh/a en moyenne (21% de la production hydroélectrique allemande). Les 14 centrales au fil de l'eau sur le Haut-Rhin et le Rhin supérieur produisent quant à elles 2500 GWh/a (part des aménagements frontaliers de l'Allemagne).

L'échange d'électricité entre l'Allemagne et les pays voisins est assez important, à savoir en 1999 les exportations s'élevaient à 39 558 GWh et les importations atteignaient 40 598 GWh (Tableau II) [1].

Avec ses centrales thermiques, prédominantes dans le paysage énergétique allemand, ce pays exporte surtout de l'énergie de base qui lui permet d'importer de l'énergie de pointe.

Compte tenu du fait que l'électricité est essentiellement produite par des centrales thermiques et que la capacité des centrales hydroélectriques à accumulation est très faible, les aménagements de pompage-turbinage jouent un rôle important. Leur puissance installée est, avec ses 4523 MW, plus élevée que celle des centrales de turbinage pur. En 1997, les centrales de pompage-turbinage ont fourni 4000 GWh tout en consommant en même temps 5325 GWh [1].

Au total, il existe en Allemagne 311 barrages dont la plupart sont des aménagements à buts multiples. Selon le registre mondial des barrages, 87 barrages ont une hauteur supérieure à 15 m [4], aucun de ces barrages n'atteint les 100 m. Le volume brut de tous les barrages recensés dans le registre est de 2,6 km^3, dont seulement une partie est disponible pour la production de l'énergie de pointe (Tableau III).

Actuellement, plusieurs aménagements hydroélectriques (> 500 kW) avec une puissance totale de 5 MW sont en construction (Tableau IV) [1]. La même puissance est en construction pour les petites centrales (< 500 kW).

Depuis 1997, l'aménagement de pompage-turbinage de Goldisthal, avec une puissance de turbinage de 1060 MW est en chantier. Il sera composé d'un bassin supérieur (digue périmétrique de 3370 m de longueur) et d'un bassin inférieur (barrage en enrochement de 67 m de hauteur) avec un volume utile de 12 millions de m^3 chacun. Il comporte une centrale souterraine équipée de 4 machines réversibles [5]. L'inauguration est prévue pour 2003. Un autre barrage-poids de 93,5 m de hauteur est en construction (Leibis/Lichte) pour créer un réservoir d'approvisionnement en eau potable.

L'ouverture du marché d'électricité a démarré en Allemagne en avril 1998.

Pays	Caractéristiques du pays			Echange d'électricité (1999)	
	Ruissellement (km^3)	Surface (km^2)	Population (mio)	Importation (GWh)	Exportation (GWh)
Allemagne	~ 90,0	356 974	82	40 598	39 558
Autriche	56,2	83 858	8	11 608	13 507
France	41,6	549 000	58,1	3 300	72 700
Italie	110,0	301 277	57	42 539	0
Slovénie	18,0	20 250	2	606	1 939
Suisse	53,5	41 293	7,08	37 064	4 729

Tableau II Caractéristiques des pays alpins et échange de l'électricité.

Autriche

Parmi les pays alpins, l'Autriche est celui qui assure la plus grande partie de son approvisionnement en électricité par l'hydroélectricité (environ 65%). Les centrales hydroélectriques autrichiennes, avec leur puissance installée cumulée de 11 500 MW, ont produit en 1999 37 500 GWh/a (Tableau I) [1].

Le potentiel spécifique moyen techniquement réalisable de 0,64 GWh par an et par km^2 est considérable, mais plus petit que celui de la Suisse (0,86 GWh par an et par km^2) [6].

Grâce à la topographie favorable, la production d'énergie électrique est concentrée dans les Alpes, surtout au Tyrol et en Carinthie, mais aussi dans le Vorarlberg et dans la province de Salzbourg, où

se trouvent des aménagements à accumulation. Un potentiel important existe également le long du Danube, au nord-est de l'Autriche.

L'échange d'électricité avec les pays voisins est moins important que pour la Suisse, dont la production d'énergie électrique est comparable. En 1999, 11 608 GWh ont été importés et 13 507 GWh exportés (Tableau II) [1]. Puisque les aménagements à accumulation permettent de produire une grande part de l'énergie hydraulique (environ 30%), l'Autriche est considérée comme un important fournisseur en énergie de pointe. De plus, ces aménagements sont souvent combinés avec des centrales de pompage-turbinage; la puissance de turbinage installée de ces centrales combinées représente 2060 MW. En 1999, le pompage a consommé 1575 GWh de l'énergie de base qui ont été reconvertis en 1160 GWh de l'énergie de pointe [1].

Parmi les 146 barrages (≥ 15 m) dont dispose l'Autriche, la plupart sont presque exclusivement destinés à la production d'hydroélectricité [4]. Le volume utile cumulé de ces retenues est de 1,8 km³, ce qui permet de produire de l'énergie de pointe (Tableau III). Quatre barrages ont une hauteur supérieure à 150 m: Kölnbein (200 m), Zillergründl (186 m), Gepatsch (153 m) et Finstertal (150 m) (Figure 2).

Depuis février 1999, l'ouverture du marché de l'électricité poursuit son chemin par étapes. La grande incertitude occasionnée par cette libéralisation provoque le ralentissement dans la réalisation de nouvelles centrales; il n'y a que 27 MW qui sont actuellement en construction (Tableau IV).

Le plus grand projet achevé récemment (en 1998) est la centrale de Freudenau sur le Danube, dont la puissance installée est de 172 MW, pour une production de 1052 GWh/a. Le coût de production de cette centrale est de 1.4 ATS (environ 0.155 CHF par kWh) [7]. Pour les centrales en exploitation en Autriche, ces coûts varient entre 0.17 ATS et 1.60 ATS (0.018 et 0.177 CHF) [1].

Toutes les centrales hydroélectriques en Autriche permettent d'éviter l'émission de 30 millions de tonnes de CO_2 par an, ce qui est considérable par rapport aux émissions totales actuelles des centrales thermiques (10,8 miop t) [7].

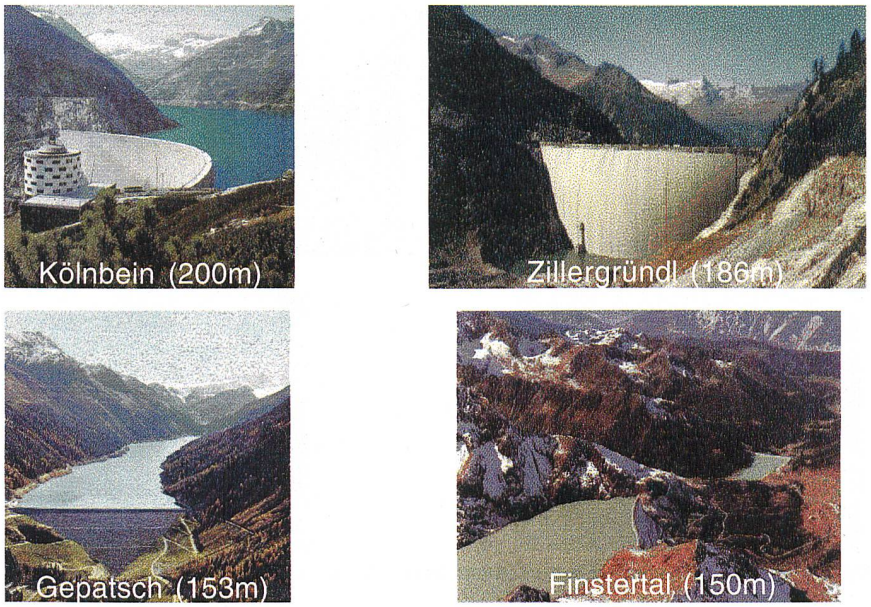

Figure 2 Barrages autrichiens dont la hauteur est supérieure à 150 m.

Pays	Nombre de barrages				Volume utile des retenues
	H ≥ 15 m	H ≥ 60 m	H ≥ 100 m	H ≥ 150 m	(km³)
Allemagne	87	15	0	0	2,6 (volume brut)
Autriche	146	16	10	4	1,8
France	294	51	15	4	7,5
Italie	305	66	17	5	5,6
Slovénie	18	1	0	0	0,2
Suisse	140	48	25	9	3,4

Tableau III Nombre de barrages dans les pays alpins et volumes totaux des retenues (selon le Registre Mondial des Barrages 1998).

France

En France, 15% de la production d'énergie électrique sont assurés par les centrales hydrauliques. La production moyenne escomptée des 1900 centrales (y compris les minicentrales) est de 69 800 GWh/a pour une puissance totale installée de 25 200 MW (Tableau I) [1]. 550 centrales hydrauliques ont une puissance supérieure à 10 MW. La production effective en 2000 était de 72 000 GWh. Ce record est dû à une très bonne année hydraulique. Les aménagements à accumulation sont situés principalement dans les Alpes; un nombre important de centrales au fil de l'eau se situe sur le Rhin et sur le Rhône.

La France est le plus grand pays exportateur d'électricité en Europe. Par rapport à ses importations de 3300 GWh, les exportations ont atteint en 2000 le volume de 72 700 GWh (Tableau II). Les pays importateurs sont la Grande-Bretagne, l'Allemagne, l'Espagne, la Suisse et surtout l'Italie.

Les 294 barrages français ≥ 15 m créent un volume utile cumulé pour toutes les retenues de 7,5 km³ (Tableau III). Quatre barrages dépassent les 150 m de hauteur: Tignes (180 m), Grand'Maison (160 m), Monteynard (155 m) et Roselend (150 m) (Figure 3). Les centrales à accumulation saisonnière contribuent avec environ 12 000 GWh (17%) à la production annuelle moyenne [9]. Les centrales de pompage-turbinage, dont la puissance installée est de 4300 MW, permettent une production supplémentaire de 5300 GWh/a (1997). Néanmoins, ce chiffre est à mettre en relation avec la production des centrales thermiques de 445 TWh/a (2000). La part de l'énergie réglable fournie par les aménagements à accumulation français est alors faible. En échange de l'énergie de base exportée, la France importe surtout pendant les heures de fortes demandes en électricité.

Selon le «World Atlas» [1], aucun aménagement de production supplémentaire n'est actuellement en réalisation (Tableau IV). Toutefois, les travaux en vue d'installer une turbine Francis supplémentaire de 100 MW au barrage de Bort-les-Orgues sur la Dordogne vont

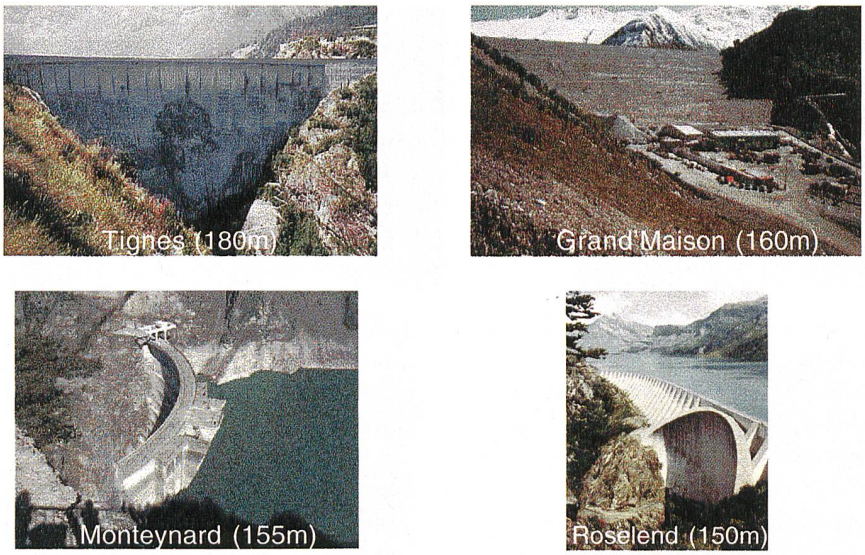

Figure 3 Barrages français dont la hauteur est supérieure à 150 m.

bientôt commencer [10]. Dans le cadre de l'augmentation du débit réservé de l'aménagement de Pierre Bénite sur le Rhône, une petite centrale de 8,6 MW, dont la production est de 47,6 GWh par année moyenne, a été mise en service en 2000 [11].

Une loi définissant les règles concernant l'ouverture du marché électrique est en vigueur depuis l'année 2000. Selon le décret, sont concernés les consommateurs finaux disposant de plus que 16 GWh par site, atteignant ainsi le degré d'ouverture minimum fixé par la directive (3070 en 2000).

Italie

Pour l'Italie, les ressources en eau situées dans l'arc alpin sont vitales. Environ 50% du ruissellement de l'Italie a pour origine les Alpes.

En 1999, 19,4% de la production totale de l'énergie électrique ont été assurés par l'hydraulique (Tableau I) [1]. L'énergie annuelle produite en 1999, dans environ 1600 centrales hydrauliques, était de 47 359 GWh avec une puissance installée totale de 15 267 MW. 97% de cette production viennent des 700 grandes centrales [12]. En complétant en 1999 sa production totale de 265 692 GWh par l'importation de 42 539 GWh, l'Italie est actuellement le plus grand importateur d'électricité en Europe (Tableau II).

La capacité des centrales en service n'est pas suffisante pour couvrir la demande du pays. Ainsi, plusieurs centrales thermiques conventionnelles, aujourd'hui hors service, pourraient être réactivées si les importations devenaient trop chères.

Parmi les pays de l'arc alpin, l'Italie possède, avec environ 550 grands barrages, le plus grand nombre de barrages [13]. Selon le registre mondial, 305 barrages dépassent 15 m et créent un volume utile de 5,6 km³ (Tableau 3). Le volume utile cumulé de toutes les retenues italiennes atteint 9,1 km³, ce qui correspond à 6% du ruissellement total en Italie (155 km³). Les précipitations étant distribuées très inégalement, 26% des retenues sont destinés à l'irrigation, 60% à l'hydroélectricité et 14% ont des fonctions multiples.

Pays	Puissance en construction (MW)		Nombre de barrages en construction (≥ 60 m)	
	1999	2000	1999	2000
Allemagne	5	5	1	2
Autriche	27	27	0	0
France	0	0	0	0
Italie	450	184	9	9
Slovénie	86	75	0	0
Suisse	43	50	0	0
Total	611	34	10	11

Tableau IV Aménagements hydroélectriques et barrages en construction dans les pays alpins (sans pompage-turbinage) selon Hydropower & Dams, World Atlas 2000/2001 [1].

Les centrales à accumulation peuvent produire 16 870 GWh (en 1999), soit 36% de l'énergie hydroélectrique qui servent à couvrir les pointes de fortes demandes. Les aménagements de pompage-turbinage, avec une puissance installée d'environ 7000 MW, contribuent également à combler ces pointes de consommation en produisant 6230 GWh d'énergie de pointe en remplacement de 8903 GWh de l'énergie de base (1999).

Cinq barrages dépassent une hauteur de 150 m en Italie: Vajont (262 m, hors service depuis 1963), Alpe Gera (174 m), Speccheri (157 m), Place Moulin (155 m) et Santa Giustina (153 m) (Figure 4).

En ce qui concerne les aménagements et les barrages en construction, l'Italie est le pays alpin le plus actif dans ce domaine. Des aménagements d'une puissance totale cumulée de 450 MW étaient en construction en 1999 (Tableau IV). La centrale de Villeneuve, de 184 MW, est le plus grand projet (inauguration prévue pour 2001). A part cela, l'Italie est actuellement en train de construire 9 barrages de plus de 60 m de hauteur destinés à l'irrigation et à l'approvisionnement en eau potable.

Suite à la nouvelle législation concernant l'ouverture du marché d'électricité en Italie, une restructuration importante de la Compagnie nationale d'électricité (ENEL) est en cours.

Slovénie

La force hydraulique en Slovénie est exclusivement exploitée sur trois rivières: Drava, Save et Soca [14]. En 1999, avec une puissance installée de 846 MW, les centrales hydrauliques au fil de l'eau ont produit 3684 GWh en fournissant ainsi 29,6% de la production d'électricité du pays (Tableau I). En une année hydrologique moyenne, les 15 centrales slovènes de puissance supérieure à 10 MW et les 450 petites et minicentrales produisent 3700 GWh.

Le volume utile total de 0,2 km² créé par les retenues des 18 barrages slovènes ≥ 15 m est exclusivement destiné à la production d'énergie. Le barrage de Moste avec ses 60 m de hauteur est le plus haut barrage de ce pays (Tableau III).

En 1999, avec 1939 GWh exportés, l'exportation d'électricité a dépassé le volume importé qui était de 606 GWh. Ces importations étaient concentrées sur les périodes à forte demande.

Depuis 1997, la Slovénie est devenue membre de l'UCPTE. Fin 1999, une nouvelle loi sur l'électricité a créé une base juridique de la privatisation du mar-

ché. Cette loi commence à entrer en vigueur.

Dans le cadre du renouvellement des centrales existantes, des aménagements d'une puissance totale supplémentaire de 75 MW sont actuellement en construction. Après l'Italie, la Slovénie occupe la deuxième place parmi les pays alpins investissant le plus dans de nouvelles constructions (Tableau IV).

Suisse

En Suisse, près de 500 centrales hydroélectriques (> 300 KW) avec une production annuelle moyenne de 34 453 GWh sont actuellement en service (1.1.2001). Elles fournissent 58% (2000) de la production d'énergie électrique [1, 15]. Avec 38% assurés par les centrales nucléaires (2000), la Suisse est le seul pays de l'arc alpin dont la production d'énergie électrique est pratiquement entièrement exempte de rejets de CO_2 [16].

Plus de la moitié de la production des centrales suisses, soit une puissance totale installée de 13 229 MW (Tableau I), provient des centrales à accumulation. Ces centrales peuvent fournir en année moyenne environ 19 300 GWh (56%) d'énergie de pointe. La production de cette énergie de haute qualité a été rendue possible par la construction de retenues saisonnières dont le volume utile est de 3,4 km³. Il est ainsi possible de stocker 8,5% du ruissellement total en Suisse (40,4 km³ sans apport de l'étranger). Le plus grand nombre de ces centrales, et surtout des aménagements à accumulation, se trouve dans les cantons alpins: dans les Grisons (bassin versant du Rhin) et en Valais (bassin versant du Rhône). La Suisse dispose de 140 barrages dont la hauteur est supérieure à 15 m (Tableau III). Avec ses 285 m de hauteur, le barrage de la Grande Dixence est toujours le plus haut barrage en béton dans le monde. Huit autres barrages ont une hauteur supérieure à 150 m: Mauvoisin (250 m), Luzzone (225 m), Contra (220 m), Emosson (180 m), Zeuzier (156 m), Göschenerlp (155 m), Curnera (155 m) et Zervreila (151 m) (Figure 5).

Parmi les pays de l'arc alpin, mais aussi au niveau européen, la Suisse est donc le pays qui possède le plus grand nombre de barrages d'une hauteur supérieure à 150 m.

Pour l'Europe, la Suisse est une importante plate-forme d'échange d'électricité. En effet, le volume d'importations et d'exportations dépasse la production hydroélectrique annuelle. Grâce à des conditions hydrologiques favorables, en 1999 (40 806 GWh), la Suisse a exporté 47 293 GWh d'électricité tout en important la même année 37 064 GWh (Tableau II, exportation nette environ 10 000 GWh). En général, la Suisse, considérée comme principal producteur d'énergie de pointe, exporte surtout de l'énergie pendant les périodes à forte demande et importe de l'énergie de base surtout en hiver.

D'autre part, une puissance totale supplémentaire de 1756 MW est disponible grâce aux centrales de pompage-turbinage qui produisent 1660 GWh/a en moyenne [1].

La construction de nouvelles centrales en Suisse est actuellement à son plus bas niveau, il n'y a que 43 MW qui sont en train d'être réalisés et ceci uniquement dans le cadre du renouvellement et de l'extension des centrales existantes (Tableau IV). La dernière importante centrale inaugurée récemment est la nouvelle centrale de Ruppoldingen de 19 MW.

L'ouverture du marché d'électricité est réglée par la nouvelle loi contre laquelle un référendum est lancé. La dérégulation complète du marché se fera progressivement pendant une période de six ans.

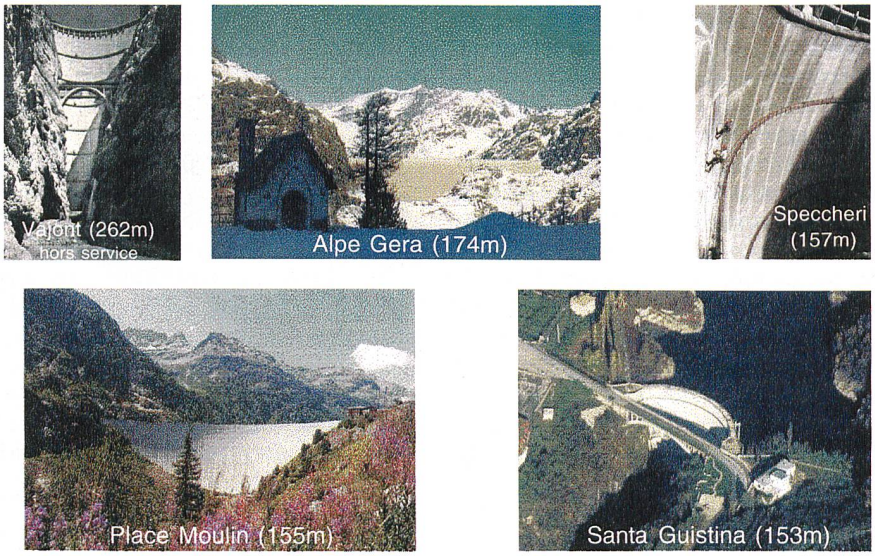

Figure 4 Barrages italiens dont la hauteur est supérieure à 150 m.

Rôle actuel de l'arc alpin dans l'Europe de l'électricité

Aujourd'hui, environ 37% de l'hydroélectricité en Europe (39 pays, sans Turquie et Russie) sont produits dans les 6 pays de l'arc alpin (Figure 6). Il résulte de la situation topographique que 41% de

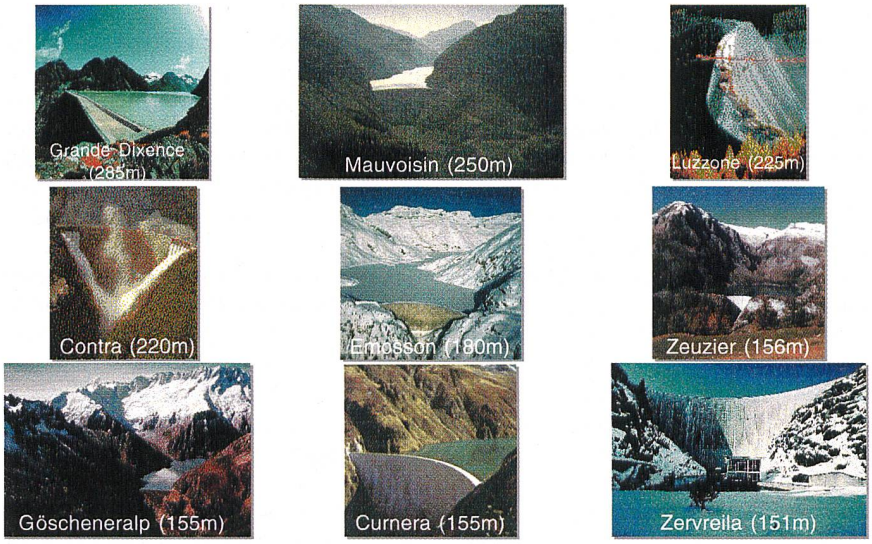

Figure 5 Barrages suisses dont la hauteur est supérieure à 150 m.

la puissance disponible dans toutes les centrales hydroélectriques en Europe se trouvent dans l'arc alpin (Figure 7). De plus, ce sont ces pays alpins qui disposent d'une importante production de l'énergie réglable permettant de satisfaire les besoins lors des périodes de fortes demandes et de contrôler la fréquence dans le réseau européen. Les aménagements de pompage-turbinage situés dans l'arc alpin d'une puissance totale de près de 20 000 MW totalisent 54% de toute la puissance installée en Europe pour ce type d'aménagement. Ils contribuent considérablement à la sécurité de l'approvisionnement en énergie électrique de l'Europe.

Le développement du potentiel hydraulique de l'arc alpin est actuellement très faible. En 2000, il ne représentait que la puissance supplémentaire de 341 MW qui était en train d'être réalisée, ce qui correspond à 15% de toutes les centrales en construction en Europe.

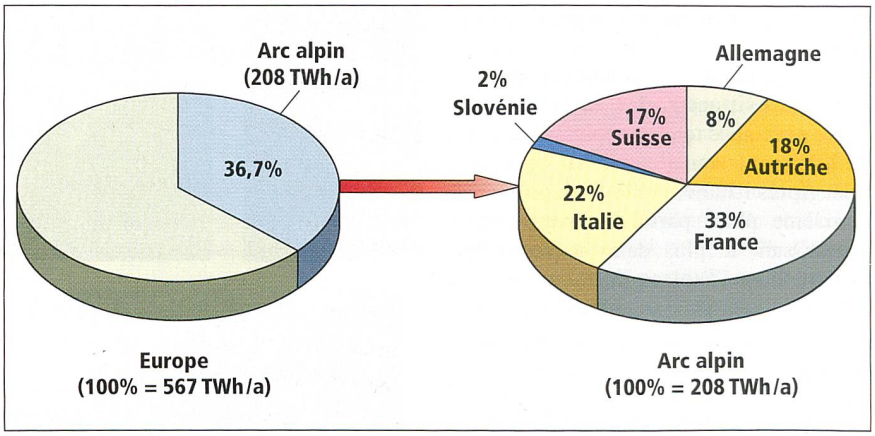

Figure 6 Production des centrales hydrauliques en Europe (sans Turquie et Russie) et dans l'arc alpin.

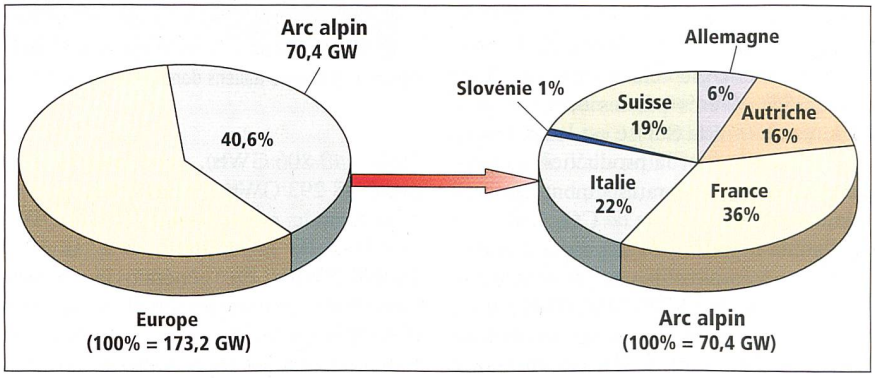

Figure 7 Puissance des centrales hydrauliques en Europe (sans Turquie et Russie) et dans l'arc alpin (sans pompage-turbinage).

Prévisions et développement futur

Allemagne

De nos jours l'Allemagne utilise environ 64% de son potentiel techniquement réalisable, soit 80% de son potentiel économiquement réalisable (Tableau I). Le potentiel restant se situe entre 4000 GWh/a et 9000 GWh/a.

La Bavière, la région avec le plus grand potentiel, exploite déjà 80% de ses ressources techniquement exploitables [3]. L'érosion du lit du Lech est actuellement contrôlée par une série de seuils, dont six doivent être renouvelés. En combinant le renouvellement de ces ouvrages de protection contre l'érosion avec des aménagements au fil de l'eau, environ 170 GWh/a supplémentaires pourraient encore être exploités. L'aménagement de la voie fluviale sur le Danube ouvre la possibilité de dégager encore 400 GWh/a. Finalement, sur la partie aval de la Salzach, entre Laufen et Burghausen, plusieurs aménagements à basse chute, d'une production totale de 600 GWh/a, sont planifiés, mais ce projet soulève beaucoup de controverses. Ces aménagements pourraient également contribuer à la stabilisation du lit qui s'est déjà abaissé de 1 à 3 m [3]. Les ressources à exploiter sont donc celles liées à des aménagements à buts multiples.

Un potentiel appréciable de 2400 GWh/a avec 485 MW a été identifié au Bade-Wurtemberg, où l'utilisation du potentiel techniquement réalisable n'est que de 60%. Le renouvellement et l'exploitation des aménagements au fil de l'eau sur le Rhin représentent un potentiel d'environ 1100 GWh/a, dont 300 GWh/a sur le haut Rhin. Dans le cadre de la réalisation d'une voie de navigation sur le Neckar, près de 500 GWh/a sont techniquement exploitables, mais à ce jour l'utilisation de seulement 120 GWh/a a été planifiée [2].

Les coûts de revient en cas de réalisation du potentiel en Bade-Wurtemberg ont été estimés à 6.5 à 9.0 DPf/kWh [0.05 à 0.07 CHF] pour les grandes centrales (> 10 MW), 11 DPf/kWh [0.085 CHF] pour les moyennes et 15 DPf/kWh [0.116 CHF] pour les minicentrales (< 0,1 MW) [2].

L'Allemagne dispose de plusieurs sites favorables à la réalisation d'aménagements de pompage-turbinage, surtout en Bade-Wurtemberg et en Thuringe.

Autriche

Le deuxième plus grand potentiel hydroélectrique des pays alpins qui n'est pas encore exploité se situe en Autriche où seulement 67% du potentiel techniquement réalisable et 70% du potentiel économiquement réalisable sont exploités (Tableau I). Entre 16 000 GWh/a et 18 500 GWh/a peuvent être développés, dont une partie importante (35%) doit être recherchée dans des aménagements à accumulation [8].

Le potentiel hydraulique restant se situe surtout au Tyrol (33%), en Styrie (13%), en Carinthie (12%) et dans la province de Salzbourg (13%).

Compte tenu de l'incertitude liée à l'ouverture du marché d'électricité et par conséquent au développement de la demande, seul un petit nombre de projets est actuellement à l'étude en vue d'une éventuelle réalisation. Il est planifié d'augmenter de 100 MW la puissance de l'aménagement de pompage-turbinage de Ranna/Falkenstein. De plus, deux nouveaux aménagements à accumulation sont prévus: Salzach (15,5 MW/74 GWh/a) et Gerlos II (135 MW) [1]. A ceci s'ajoute la construction de quelques petites centrales, d'une puissance totale de 80 MW. De plus, la construction d'une nouvelle centrale de 4 MW (Hochwuhr) et le renouvellement de la centrale de Feldkirch sur la rivière Ill démarreront fin 2001.

Le ralentissement que connaît aujourd'hui l'Autriche dans le développement de son potentiel hydraulique est également dû au renforcement des milieux écologiques soulevant la question de l'impact sur l'environnement et des investissements très lourds que toute nouvelle construction peut entraîner. Tous ces facteurs freinent les études de réalisation de nouvelles retenues dans les Alpes autrichiennes [6, 7, 8]. Dans ces conditions, le renouvellement et l'optimisation des aménagements existants devient un défi majeur de l'Autriche.

France

En France, le potentiel techniquement et économiquement réalisable est presque entièrement exploité (97 à 98%). Les investissements futurs vont alors se concentrer sur le renouvellement et l'optimisation des aménagements existants. Actuellement, Electricité de France (EdF) s'est engagée dans le développement de ressources hydrauliques en Chine, en Indonésie, en Inde, au Laos, en Argentine et en Guinée [1].

En Corse, la réalisation de la centrale de Rizzanese, avec une puissance installée de 54 MW, est prévue.

Dans les années 90, la faisabilité de quatre aménagements dans les Alpes françaises combinés avec du pompage-turbinage a été étudiée [17]. Parmi les projets choisis pour cette étude, celui sur la rivière Romanche (500–700 MW) a de bonnes chances d'être réalisé.

Une autre étude a permis d'estimer le potentiel hydraulique des rivières navigables en France [18]. Dans les conditions du marché actuel, les possibilités de développement sont limitées à une puissance totale de 50 MW permettant de produire 250 GWh/a. La chute moyenne de ces aménagements au fil de l'eau sur le Doubs, le Lot et la Seine est de 2,5 m. Le développement de 54 sites identifiés devient intéressant à condition que le coût de production d'un kWh ne dépasse pas 0.075 Euro (0.114 CHF).

Italie

Avec un tiers du potentiel technique encore à exploiter, l'Italie se place en tête des pays alpins à forte activité dans le domaine des réalisations hydroélectriques (cf. 3.4). Le potentiel économiquement réalisable, estimé avec prudence à 54 000 GWh/a, n'est exploité qu'à 80% [1].

Selon une étude de l'ENEL, la réalisation de nouvelles grandes et moyennes centrales pourrait assurer la production supplémentaire de 11 500 GWh/a et celle des petites centrales 2500 GWh/a. Le renouvellement et l'optimisation des centrales existantes permettraient une augmentation de 5000 GWh/a [12].

Le développement futur des retenues est étroitement lié à la croissance des besoins en eau potable et industrielle ainsi qu'à la nécessité de mise en place des mesures de protection contre les crues. Pour couvrir la demande croissante des prochaines décennies, la construction des retenues d'un volume utile supplémentaire de 5 à 6 km^3 sera nécessaire.

Compte tenu de ces prévisions, l'ENEL planifie pendant les dix prochaines années la construction de 35 nouvelles centrales et prévoit 13 projets de renouvellement, ce qui représente au total 3100 MW supplémentaires dont la production escomptée sera de 6100 GWh/a. S'y ajoutera l'aménagement de pompage-turbinage de Piedilago de 1100 MW, qui est actuellement au stade de projet [1].

Slovénie

La Slovénie exploite aujourd'hui environ 42% de son potentiel technique et 60% de son potentiel économique [1].

Pour couvrir la demande en électricité des vingt prochaines années, il est prévu d'augmenter considérablement la partie hydroélectrique, en passant de 26% actuels à 42% en 2020 [14]. Les projets suivants sont prévus sur les quatre grandes rivières slovènes:

- Rivière Drava: modernisation de cinq centrales existantes dans le but de disposer de 70 MW de puissance supplémentaire pouvant produire 140 GWh/a.
- Rivière Save: réalisation de deux cascades avec dix aménagements au fil de l'eau. Renouvellement et extension de deux centrales existantes permettant la production de 1160 GWh/a (puissance installée 335 MW).
- Rivière Soca: reconstruction de deux centrales existantes à basse chute et réalisation de 2 centrales à accumulation avec une production annuelle de 335 GWh (puissance installée 227 MW).
- Rivière Mura: construction de trois aménagements au fil de l'eau sur la frontière avec l'Autriche et de deux aménagements en Slovénie dont la production totale sera de 400 GWh/a et la puissance totale installée de 75 MW. Ces projets sont vivement contestés par des organisations écologiques et par conséquent leur réalisation paraît pour l'instant assez compromise.

De plus, la construction d'un aménagement de pompage-turbinage de 150 MW est planifié sur la rivière Drava.

Suisse

En Suisse, le potentiel économiquement réalisable est exploité à plus de 90% et le potentiel technique réel est réalisé à plus de 80%.

La plupart des grands aménagements suisses à accumulation datent d'il y a 40 à 50 ans. Ces ouvrages produisent de l'énergie de pointe au moment précis où la demande du réseau est la plus élevée et permettent ainsi de stabiliser la fréquence, ce qui constitue un important facteur de compétition pour les échanges d'électricité au niveau international.

Afin de préserver cette énergie renouvelable et précieuse, la modernisation des aménagements sera indispensable au cours des prochaines décennies. Il s'agit notamment d'optimiser ces ouvrages en augmentant leur puissance et leur capacité de retenue par la surélévation des barrages existants partout où c'est encore possible. Le but de ces extensions est d'atteindre une meilleure rentabilité, argument de taille dans un marché libéralisé et privatisé.

Une étude réalisée en 1987 a permis de procéder à une analyse systématique des possibilités de réalisation de nouveaux aménagements, ainsi que du renouvellement, de l'optimisation et de l'extension des aménagements existants [19]. La faisabilité des projets concrets était estimée sur la base de la rentabilité, de l'évolution de la demande, des impacts sur l'environnement, de l'acceptation par la région concernée, ainsi que de l'échéance de la concession et des débits minimaux selon la loi en vigueur.

Avec une pondération des projets conforme à ces critères, on a défini une fourchette prévisionnelle qui s'étend entre une perspective plutôt optimiste et plutôt pessimiste (Tableau V et Figure 8).

Selon cette prévision, une hausse de la production annuelle de 5 à 10% (5,5 à 11%) jusqu'en 2020 (5,5 à 11% jusqu'en 2050) par rapport à la production actuelle paraît réaliste.

La croissance correspondante de la production hivernale est de 14 à 23% (14,5 à 24,5%); la puissance maximale disponible augmentera de 25 à 38% (27 à 40%).

Les exigences de la loi sur la protection des eaux (art. 31) conduiront, après assainissement de tous les aménagements, à une réduction de la production annuelle de l'ordre de 1900 GWh (atteint en 2020). En vertu de l'art. 33 de la loi, les autorités exécutives, les cantons, sont tenus d'accroître les débits minimaux autant que le permettra l'évaluation des divers intérêts en présence. Selon les critères choisis, on peut s'attendre à une réduction de la production dans un éventail qui peut passer presque du simple au double (Tableau VI) [20].

Compte tenu des baisses de production résultant des débits minimaux, la contribution probable de la force hydraulique devrait diminuer entre 2020 et 2050 (Tableau VII et Figure 8).

En conclusion, jusqu'en 2020, la contribution nette de la force hydraulique pourra être légèrement augmentée par rapport à la production actuelle, soit de 4 à 9% pour la production annuelle et de 13 à 21,5% en hiver. Cette prévision est un peu plus optimiste que celle de l'Association des entreprises suisses d'électricité (AES) [21]. En revanche, pour l'horizon de 2050, il faut s'attendre à une baisse sensible de la production par rapport au niveau actuel, car les réglementations sur les débits minimaux auront à ce moment déployé tous leurs effets.

Cela dit, il subsiste un potentiel d'augmentation massive de la puissance hydroélectrique globale. Celle-ci pourrait être accrue de 27 à 40% d'ici à 2050 en équipant les ouvrages existants de nouveaux systèmes d'adduction d'eau et en augmentant les capacités de retenue. Ce potentiel présente un grand intérêt dans le cadre de l'extension des réseaux interconnectés.

Le projet «KWO plus», de l'entreprise Kraftwerke Oberhasli S.A., suit parfaitement cette stratégie. La première phase de ce projet a déjà démarré et sera réalisée en trois parties [22]:

- Nouvelle galerie en charge Handeck-Innertkirchen 1 et réfection de l'ancienne centrale
- Renouvellement de la centrale de Grimsel 1 par une nouvelle turbine
- Rehaussement de 23 m de deux barrages du lac de Grimsel ce qui augmentera le volume utile actuel de 95 mio m³ à 170 mio m³.

La réalisation de la première phase permettra une augmentation de la puissance de 52 MW et par conséquent de la production annuelle de 80 GWh. La production supplémentaire en hiver atteindra 200 GWh.

Dans la deuxième phase, la puissance installée sera augmentée de 1000 MW grâce à la construction de deux nouvelles centrales (Grimsel 3 et Innertkirchen 3).

Prévision (sans pertes dues aux débits minimaux)	2020 Minimale	2020 Maximale	2050 Minimale	2050 Maximale
Production annuelle	35 650 GWh	37 390 GWh	35 850 GWh	37 735 GWh
Production hivernale	17 085 GWh	18 490 GWh	17 170 GWh	18 660 GWh
Puissance installée	14 970 MW	16 450 MW	15 150 MW	16 780 MW

Tableau V Possibilité d'extension de la force hydraulique.

Réductions probables de la production	2020 Minimale	2020 Maximale	2050 Minimale	2050 Maximale
Production annuelle	260 GWh	380 GWh	1960 GWh	3755 GWh
Production hivernale	140 GWh	270 GWh	1020 GWh	1950 GWh

Tableau VI Réduction de la production par l'augmentation des débits minimaux après le renouvellement des concessions.

Prévision (avec pertes dues aux débits minimaux)	2020 Minimale	2020 Maximale	2050 Minimale	2050 Maximale
Production annuelle	35 390 GWh	37 010 GWh	33 890 GWh	33 980 GWh
Production hivernale	16 945 GWh	18 220 GWh	16 150 GWh	16 710 GWh

Tableau VII Future contribution probable de la force hydraulique en Suisse.

Les investissements nécessaires pour la phase 1 sont de 300 mio CHF et 900 mio CHF pour la phase 2, ce qui correspond aux investissements consentis entre 1925 et 2000 pour l'aménagement de l'Oberhasli.

Arc alpin comme source d'énergie renouvelable et réglable pour l'Europe

Un peu plus des trois quarts du potentiel technique total de 272 TWh/a sont déjà utilisés par les six pays de l'arc alpin. La production actuelle de 208 TWh/a a dépassé 86% du potentiel économique. L'arc alpin dispose encore de réserves en énergie renouvelable se situant entre 33 000 GWh/a (économiquement réalisables) et 64 000 GWh/a (techniquement réalisables) pour une puissance installée supplémentaire de 10 000 à 20 000 MW. Ces réserves correspondent à 6–11% de la production actuelle de toutes les centrales hydrauliques en Europe et à 6–12% de leur puissance totale. Cette possible contribution future paraît faible, mais il faut souligner qu'il s'agit essentiellement d'énergie réglable, capable de couvrir les demandes de pointe de l'ensemble de l'Europe.

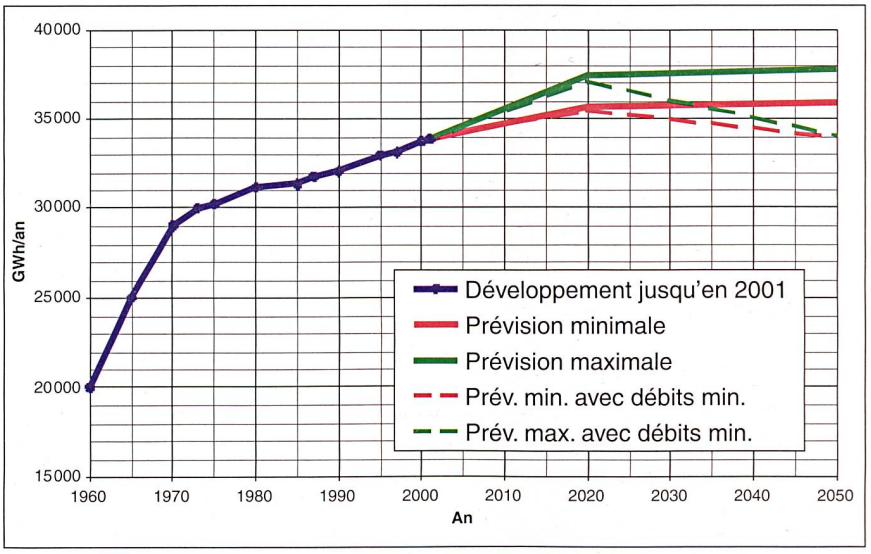

Figure 8 Développement de la force hydraulique en Suisse depuis 1960 et possibilités d'extension jusqu'en 2050.

En ce qui concerne la possibilité d'augmenter la production annuelle, environ 75% des réserves du potentiel de l'arc alpin se trouvent en Autriche et en Italie. Plus de 90% des réserves de puissance correspondantes sont situées dans les trois pays de l'arc alpin, à savoir l'Autriche, l'Italie et la Suisse (sans pompage-turbinage).

Conscients de leurs ressources, les pays alpins ont déjà élaboré les avant-projets de nouvelles centrales, dont la production annuelle serait d'environ 40 000 GWh pour une puissance installée de 12 500 MW. Toutefois, compte tenu de la faible croissance de la demande actuelle d'énergie électrique en Europe et du processus de libéralisation du marché de l'électricité en cours, la décision de lancer la réalisation de plusieurs projets, souvent contestées du point de vue environnemental, se fait attendre. Au fur et à mesure de la réalisation du potentiel économique, les mesures nécessaires à la préservation de l'environnement liées aux projets hydroélectriques deviennent de plus en plus importantes.

Grâce à leur topographie favorable, tous les pays de l'arc alpin disposent de sites intéressants pour la réalisation d'aménagements de pompage-turbinage, pour autant que bien évidemment, le marché d'électricité les justifie. En exploitant davantage les nouvelles énergies renouvelables, comme par exemple l'énergie solaire ou éolienne, ces aménagements de pompage-turbinage deviennent indispensables pour le stockage et la transformation en énergie de pointe de l'énergie de base produite par les installations alternatives.

Cependant, il est à craindre que l'introduction dans toute l'Europe des nouvelles lois sur la protection des eaux conduise à une réduction de la production annuelle des centrales existantes, comme on l'observe déjà en Suisse. Si cette énergie manquante est remplacée par l'énergie produite de manière aussi écologique que l'énergie hydroélectrique et si la perte de production peut être compensée par un prix de vente plus élevé des énergies renouvelables et sans émission (éco-électricité, électricité verte), ces nouvelles lois peuvent être considérées comme entièrement justifiées.

En conclusion, l'arc alpin, avec ses centrales hydroélectriques fournissant de l'énergie écologique et de haute qualité, disposant de surcroît d'un potentiel à utiliser encore considérable, jouera un rôle très important dans l'approvisionnement futur et fiable du réseau électrique européen étendu vers les pays de l'Est.

Références

[1] 2000 & 2001 World Atlas and Industry Guide, Hydropower & Dams, Aqua-Media International, 2000/2001.

[2] *Giesecke J.*: Perspektiven der Wasserkraftnutzung in Baden-Württemberg. «Wasserwirtschaft» 80, Heft 6, pp. 285–294, 1990.

[3] *Strobl T.*: Nutzung der Wasserkraft in Bayern. «Wasserwirtschaft» 82, Heft 6, 1992.

[4] Commission internationale des grands barrages: Registre mondial des barrages, ICOLD-CIGB, Paris 1998.

[5] *Bogenrieder W., Groschke L.*: Design and construction of Germany's Goldisthal pumped-storage scheme. Hydropower & Dams, Issue One, pp. 29–31, 2000.

[6] *Pircher W.*: The role of hydropower in Austria. Water Power & Dams Construction, March, pp. 12–13, 1990.

[7] *Haider H.*: The importance of hydropower for the Austrian electricity supply system. Conference proceedings: Hydropower into the next century, Gmunden, Austria, October 1999, pp. 1–9, 1999.

[8] *Schiller G., Drexler F.*: The status and prospects of hydropower in Austria. Water Power & Dam Construction, June, pp. 23–29, 1991.

[9] *Ginocchio R.*: L'énergie hydraulique, Editions Eyrolles, 1978.

[10] *Burgun P.*: The Bort les Orgues refurbishment scheme in France. Hydropower & Dams, Issue Five, pp. 53–58, 1999.

[11] *Levenq J., Comtet A.*: La réhabilitation du vieux Rhône de Pierre-Bénite. Travaux N° 765, juin, pp. 67–71, 2000.

[12] *Penati S.*: The role and main features of hydropower in Italy. Water Power & Dams Construction, March, pp. 14–16, 1990.

[13] *Dolcetta, C.*: The role of Italian dams in water resources development. Hydropower & Dams, Issue Two, pp. 31–36, 1997.

[14] *Kosnjek, Z., Hrovatin J., Ivanusic A.*: Future prospects for hydropower in Slovenia. Hydropower & Dams, Issue Four, pp. 50–55, 1997.

[15] Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz, Bundesamt für Wasser und Geologie, 2000.

[16] *Schleiss A.*: Constructions hydrauliques – facteur clé de la prospérité économique et du développement durable au XXIe siècle. Ingénieurs et Architectes Suisses, n° 9, juin 1999.

[17] *Combelles J., Bassereau J.-C.*: Activities in the French hydropower sector. Water Power & Dams Construction, March, p. 20, 1990.

[18] *Isambert F., Boucharlat E.*: Hydropower potential on navigable rivers. Conference proceedings: Hydro 2000 – Making hydro more competitive, Bern, Switzerland, October, pp. 27–36, 2000.

[19] *Allet B., Schleiss A.*: Wasserkraft in der Schweiz. Ausbau, Möglichkeit und Schranken, «Schweizer Ingenieur und Architekt», Heft 29, 1990.

[20] *Schleiss A.*: Réduction de production d'énergie dans les aménagements hydroélectriques, Bulletin VSE/AES 24, 1987.

[21] VSE/AES: Prévision 1995. Novembre 1995.

[22] *Ursin M.*: The project KWO plus: Optimizing the utilisation of hydropower potential under free market conditions. Conference proceedings: Hydro 2000 – Making hydro more competitive, Bern, Switzerland, October, pp. 51–58, 2000.

Wasserkraftpotenzial der Alpenländer

Die grössten Wasserressourcen Europas und folglicherweise auch das grösste Wasserkraftpozential befindet sich in den Alpenländern. Nahezu Dreiviertel des technischen Potenzials von 272 TWh/a werden heute schon durch die Alpenländer Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich, Slowenien und der Schweiz genutzt. Die verbleibenden Reserven an hydraulischer und erneuerbarer Energie sind beträchtlich und liegen zwischen 33 000 GWh/a (wirtschaftlich nutzbar) und 64 000 GWh/a (technisch nutzbar) mit einer zugehörigen Leistung von 10 000 MW bis 20 000 MW. Die Ausbaumöglichkeiten entsprechen 6 bis 11% der heutigen Produktion aller Wasserkraftzentralen in Europa und 6 bis 12% ihrer installierten Leistung. Obwohl dieser mögliche Zuwachs gering erscheinen mag, ist zu bedenken, dass es sich grösstenteils um Regelenergie handelt, welche zur Deckung der Bedarfsspitzen in Europa dienen kann. Die Entscheidung, die interessanten und ökologisch vertretbaren Projekte zu realisieren, lässt momentan angesichts der geringen Bedarfszunahme und der Unsicherheiten der Öffnung des Elektrizitätsmarktes auf sich warten. Die Alpenländer mit ihrer bedeutenden und umweltfreundlichen sowie nachhaltigen Wasserkraft werden jedoch auch zukünftig für die sichere Elektrizitätsversorgung im gegen den Osten erweiterten europäischen Verbundnetz eine äusserst wichtige Rolle spielen.