

Zeitschrift: Revue économique franco-suisse
Herausgeber: Chambre de commerce suisse en France
Band: 53 (1973)
Heft: 2

Artikel: L'accumulation pneumatique : une solution originale au transfert d'énergie des heures creuses aux heures de pointe
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-887420>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.04.2025

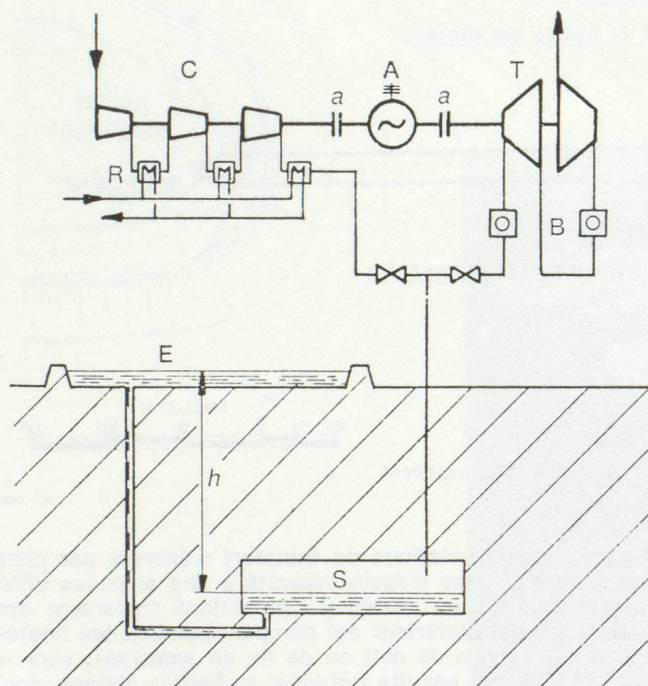
ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

L'accumulation pneumatique :

Une solution originale au transfert d'énergie des heures creuses aux heures de pointe

La part de l'énergie nucléaire dans la production mondiale d'énergie électrique doit s'accroître de plus en plus dans l'avenir et la consommation de combustible fossile pour cet usage devra plafonner. Cependant, dans le prix du kWh nucléaire le loyer des investissements initiaux entre pour une proportion très importante : de ce fait il ne serait pas économique d'équiper les réseaux pour la puissance maximale c'est-à-dire la puissance de pointe.

Il est donc particulièrement intéressant, dans ce cas, de recourir à un système de stockage d'énergie. Parmi les solutions possibles le stockage pneumatique qui fait appel également aux techniques hydrauliques pour la compensation de la pression paraît spécialement intéressant :



STOCKAGE HYDROPNEUMATIQUE AVEC COMPENSATION HYDRAULIQUE

T	Turbines	a	Accouplements
C	Compresseurs	S	Accumulateur
B	Chambres de combustion	E	Bassin
R	Réfrigérants	h	Hauteur de colonne d'eau
A	Alternateur-moteur		

consomme surtout des kWh nucléaires d'heures creuses, et un minimum de combustible fossile, la puissance maximale du groupe tournant est extrêmement élevée.

Cette solution est à retenir lorsque la puissance de pointe souhaitée est importante et que le sous-sol de la région où la centrale doit être implantée présente une structure géologique favorable.

Le principe d'une telle installation est indiqué sur la figure. Sous la forme la plus simple, elle est constituée par une ligne d'arbres comprenant une turbine à gaz (T), une machine synchrone alternateur-moteur (A) et un compresseur (C). Le stockage d'énergie peut-être effectué sous forme d'air comprimé à pression constante dans une cavité souterraine (S) en communication avec un bassin d'eau (E) en surface. La pression est fonction de la hauteur de la colonne d'eau h .

Pendant la phase d'accumulation, la turbine à gaz est désaccouplée et la machine synchrone entraîne le compresseur. Pendant la phase de restitution, c'est le compresseur qui est désaccouplé. L'air sous pression provenant du réservoir est réchauffé puis détendu dans la turbine à gaz qui entraîne l'alternateur.

Le dimensionnement du compresseur, la capacité de la cavité et le prix de l'installation dépendent du rapport du temps de production au temps de compression pour chaque cycle.

Pour $h = 450$ m, et par kWh de pointe, le nombre de kWh de compression à fournir en heures creuses est compris entre 0,75 et 0,60, la consommation de combustible entre 1,2 et 1,4 thermie, la capacité utile du réservoir nécessaire entre 0,100 et 0,080 m³.

Ces installations peuvent être prévues pour des puissances de 250 à 550 MW. Elles présentent sur les turbines à gaz conventionnelles l'avantage de pouvoir disposer d'une puissance 2,5 à 3 fois supérieure pour un même débit d'air et d'une consommation en combustible noble inférieure dans la même proportion, tout en conservant un temps de mise en service aussi rapide.

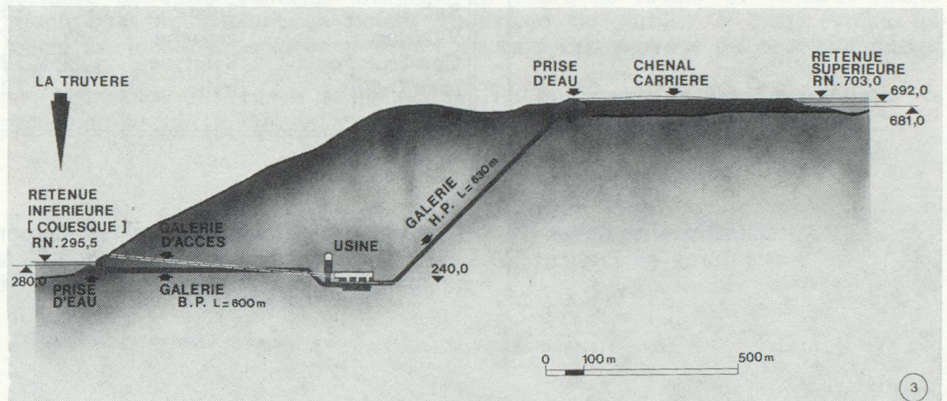
La C^{ie} Electro-Mécanique (CEM) qui a construit un grand nombre de compresseurs et de turbines à combustion de puissances élevées peut réaliser de tels groupes tournants.

Pour tous renseignements s'adresser à CEM (Compagnie Electro-Mécanique), Service P.R.E., 37, rue du Rocher, 75783 PARIS CEDEX 08.

Si l'on veut utiliser tout le creux du samedi après-midi et du dimanche (soit environ 40 heures) pour compléter le remplissage du bassin supérieur, il faut, avec la même puissance de pompage, augmenter de 5 fois la capacité des bassins : $\frac{40 \text{ heures}}{8 \text{ heures}} = 5$.

Répartie sur les cinq jours ouvrables, au cours du déstockage, cette capacité s'ajoute par fraction à celle provenant des cycles journaliers et autorise des durées de turbinage à puissance maximale plus grande : 12 heures au lieu de 6 heures dans l'exemple donné. Mais le prix de cette facilité est, nous venons de le voir, une augmentation plus que proportionnelle de la taille des réservoirs et ceux-ci, pour que l'opération soit rentable, doivent être d'une qualité assez exceptionnelle. On peut cependant n'utiliser qu'une partie des possibilités de report de fin de semaine pour limiter le surdimensionnement des bassins.

Dans l'exemple de Montezic que nous donnons plus loin, des dispositions topographiques très favorables pour le bassin supérieur et l'existence d'une grande retenue à la partie inférieure ont permis d'atteindre un cycle hebdomadaire parfait.



Montezic : profil en long

Malgré leur consommation d'énergie (on doit consommer 3 kWh pour en restituer 2), les installations de pompage sont justifiées sur le plan économique car elles utilisent au pompage de l'énergie bon marché, pour restituer aux heures de pointe une énergie de coût élevé. Elles peuvent être avantageusement comparées aux autres procédés de production de puissance modulable, le plus représentatif étant, comme nous l'avons dit, la turbine à gaz. L'intérêt qu'elles suscitent actuellement résulte des progrès techniques et économiques suivants :

- mise au point des pompes-turbines : machines hydrauliques réversibles permettant une réduction importante des coûts du matériel et du génie civil de l'usine par rapport aux groupes comportant une pompe et une turbine distinctes ;

- amélioration du rendement des centrales thermiques, à laquelle se superpose la baisse du prix des combustibles qui contribue à réduire le coût de l'énergie consommée par le pompage. Cette baisse s'accroîtra encore lorsque l'énergie nucléaire, très avantageuse en coût proportionnel comme l'était à l'époque celle provenant du lignite, sera suffisamment développée pour être disponible la nuit en heures creuses. Mais cet âge d'or du pompage ne se produira pas avant 1985/90 en France ;

- sur le plan des charges d'exploitation, les usines de pompage utilisent beaucoup moins de main d'œuvre par kW installé que les unités thermiques et cet avantage ne peut que croître au cours du temps.

III - Le développement du pompage dans le monde

Les premières réalisations remontent au début du siècle : de puissance modeste, elles consistaient à stocker de l'énergie sans utilisation immédiate par résorption des déversés d'usines hydrauliques voisines. Mais le véritable développement du pompage pur, associé au thermique, est lié à celui du transport à haute tension et date des années 30 : ainsi l'énergie bon marché des usines à lignite et l'absence de grands réservoirs hydrauliques assurent son essor en Allemagne (Herdecke, Waldeck, etc.).

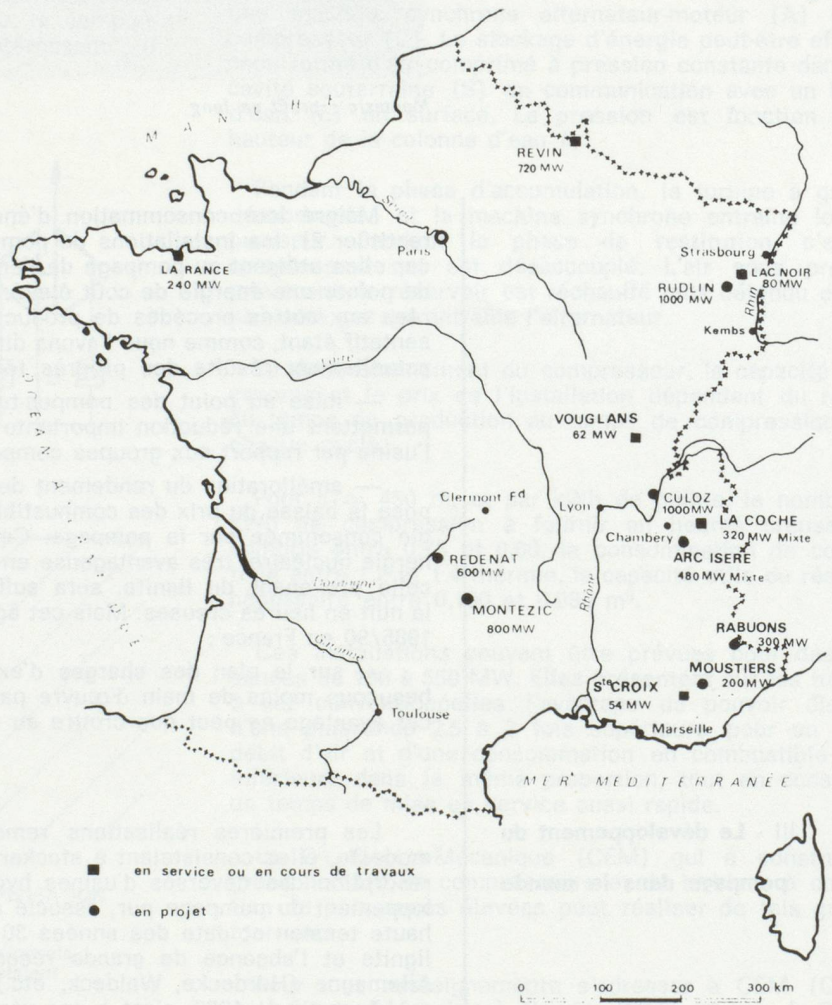
A partir de 1960, c'est à une véritable envolée qu'on assiste dans la plupart des pays industrialisés, les usines de pompage apparaissant techniquement et

économiquement bien adaptées, comme moyens de réglage puissant et d'intervention rapide (USA, Japon, Grande-Bretagne, Italie, Suisse, Luxembourg, etc.). Alors qu'en 1960, il y avait 3 300 MW de pompage installés dans le monde entier dont 2 800 MW en Europe, en 1970, 17 000 MW étaient en service (dont 8 000 en Europe, 6 000 aux Etats-Unis et 2 600 au Japon), 20 000 en commande ou à l'étude et 20 000 en construction. Les principales installations récentes en service en Europe sont les suivantes :

Aménagement	Pays	Puissance (MW)		Hauteur de mise (m)	Années de chute en service
		en pompe	enturbine		
Vianden	Luxembourg . .	700	900	280	1964
Cruachan	Écosse	448	400	367	1965
Rönkhausen	Allemagne . . .	132	140	277	1968
Robiei	Suisse	150	160	400	1968
Villarino	Espagne	570	560	400	1969
Coo Trois Ponts . .	Belgique	390	432	259	1971
Lago Delio	Italie	720	1 016	743	1971-1972

IV - Réalisations actuelles et futures en France

L'unique réalisation française de pompage pur se situait dans les Vosges : l'usine Lac Blanc-Lac Noir, équipée à 80 MW, mise en service 1933-1938 alimentée par les excédents de l'usine voisine au fil de l'eau de Kembs. Il s'y était ajouté



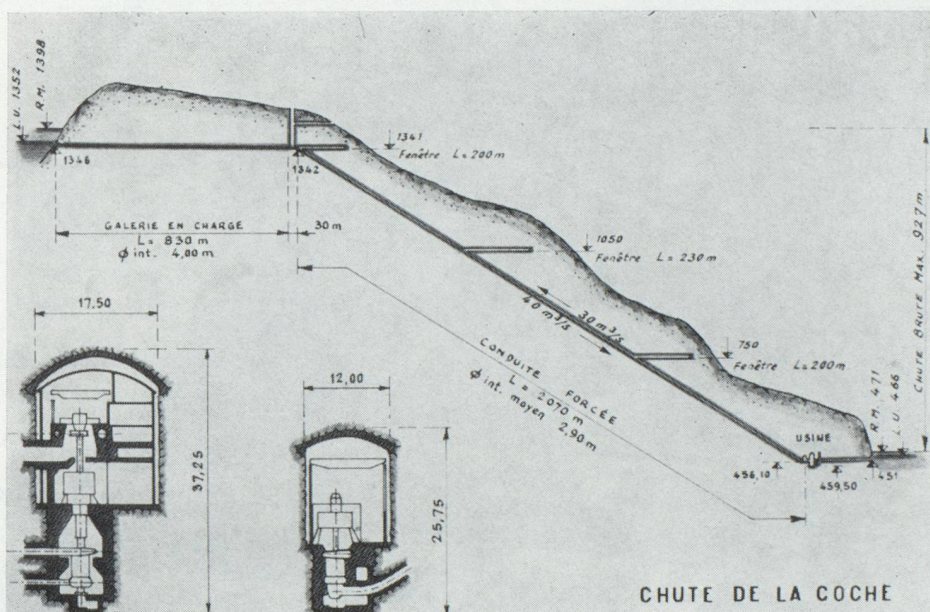
Stations de pompage en France

plus récemment, en 1956, l'usine marémotrice de La Rance dont les turbines, du type Bulbe, réversibles permettent par pompage en heures creuses d'augmenter et de mieux caler dans le temps la puissance de pointe des groupes.

Mais ce ne sont là que des cas particuliers car l'ère des grands barrages, qui est en train de s'achever, vaut à la France un équipement remarquable en réservoirs hydroélectriques qui lui garantissait un taux de modulation voisin de 30 % et lui avait permis de se tenir en dehors du mouvement mondial en faveur du pompage. Alors que les besoins d'énergie croissent rapidement (doublement en 10 ans) et que, pour y faire face, on a de plus en plus recours aux grosses unités thermiques ou nucléaires, ce n'est qu'au delà de 1980 (année de consommation 290 TWh) que les besoins d'énergie modulable correspondront à environ 15 à 18 % de la puissance totale nouvelle installée chaque année : ainsi pour l'année où la consommation atteindrait 500 TWh, 1988-1989 (puissance appelée 90 GW), le pompage pourrait représenter 7 à 8 GW, ce qui correspondrait, de 1976 à 1985, à des engagements de 0,5 GW/an, soit 500 MW/an.

La géographie de la France offre une grande variété de sites pouvant se prêter à des aménagements de pompage. Les services rendus par ces installations dépendent des schémas choisis pour leur fonctionnement comme de leur localisation vis-à-vis de la demande de pointe. De plus, la nature et l'importance de cette demande évoluent au cours du temps et l'intérêt économique d'un équipement de pointe (pompage ou turbine à gaz) évolue lui-même en fonction de la composition du parc des moyens de base (nucléaire, thermique A, etc.).

Electricité de France a inscrit, en ce qui concerne les installations de pompage jusqu'à la fin du VI^e Plan (1975), les équipements suivants :



La Coche : profil en long

Pompage pur :

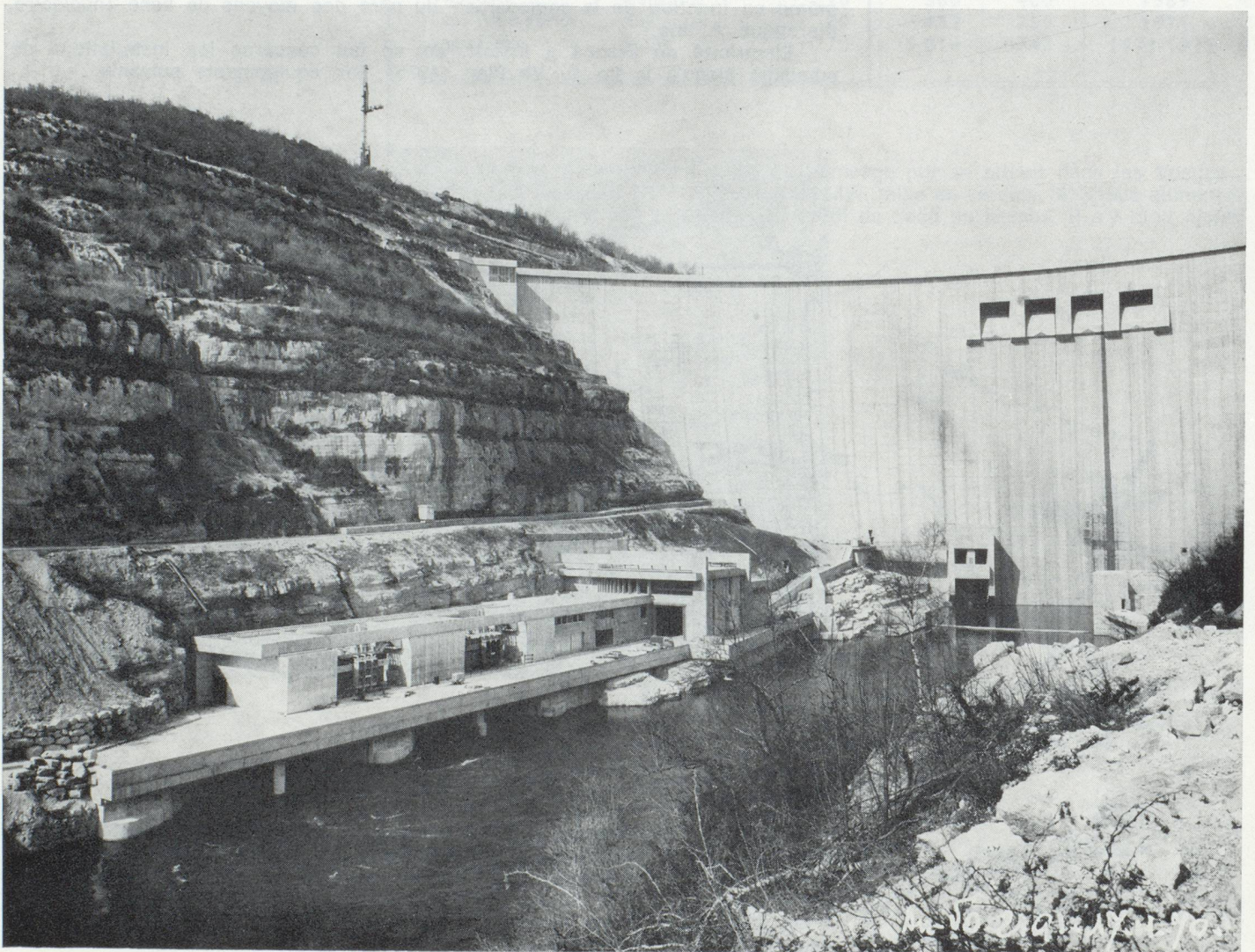
Parmi les installations de pompage pur en circuit fermé, c'est-à-dire qui n'utilisent pas et ne détournent pas l'eau d'une rivière, Revin, en cours de travaux, dans les Ardennes constitue un exemple de pompage à cycle journalier : puissance 800 MVA, bassin supérieur entièrement artificiel du type « lac collinaire » (capacité utile $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$), permettant 6 heures de fonctionnement à pleine puissance, bassin inférieur créé par un barrage sur un ruisseau. Son grand intérêt est de n'être qu'à 180 km de la région parisienne et proche de nombreuses centrales thermiques. L'équipement comprend 4 groupes « pompe-turbine » réversibles, les travaux ont été engagés en 1970 et la mise en service interviendra en 1974.

Montézic, dans le Massif Central, qui utilisera la retenue existante EDF de Couesque (sur la Truyère) et dont la puissance sera de l'ordre de 850 MW sera, au contraire, un aménagement à réserve hebdomadaire ($30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour le lac supérieur) ; les travaux préparatoires de Montézic doivent démarrer l'an prochain.

Opérations mixtes :

Dans celles-ci, le pompage est associé à des solutions classiques pour en accroître la rentabilité. C'est le cas de l'aménagement de La Coche (320 MW) dans les Alpes du Nord près de Moutiers : il s'agit d'un aménagement de haute chute (brute 930 m) ; le bassin supérieur (capacité utile $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) créé dans une cuvette naturelle surélevée stocke les eaux pompées depuis l'Isère et reçoit les apports gravitaires provenant des bassins versants voisins et dérivés par un réseau de 30 km de galeries d'adduction ; le bassin inférieur est une retenue existante de faible capacité ($425\,000 \text{ m}^3$), mais qui reçoit des débits importants en heures creuses. Les travaux ont été engagés en 1972 ; l'équipement comprend 4 ensembles binaires composés chacun d'une pompe multi-étages, que l'on fait fonctionner en turbine et d'un alternateur-moteur. Cette disposition permet une importante économie par rapport aux ensembles ternaires habituels comportant, en plus, pour cette hauteur de chute, une turbine Pelton.

Il faut mentionner également l'aménagement d'Arc-Isère (480 MW) qui achèvera l'équipement de la vallée de l'Arc en coupant la boucle formée par cette rivière et par l'Isère peu après leur confluent. Deux pompes-turbines de 240 MW chacune utiliseront les eaux régularisées de l'Arc et en recycleront une partie par pompage ; les travaux viennent de commencer.



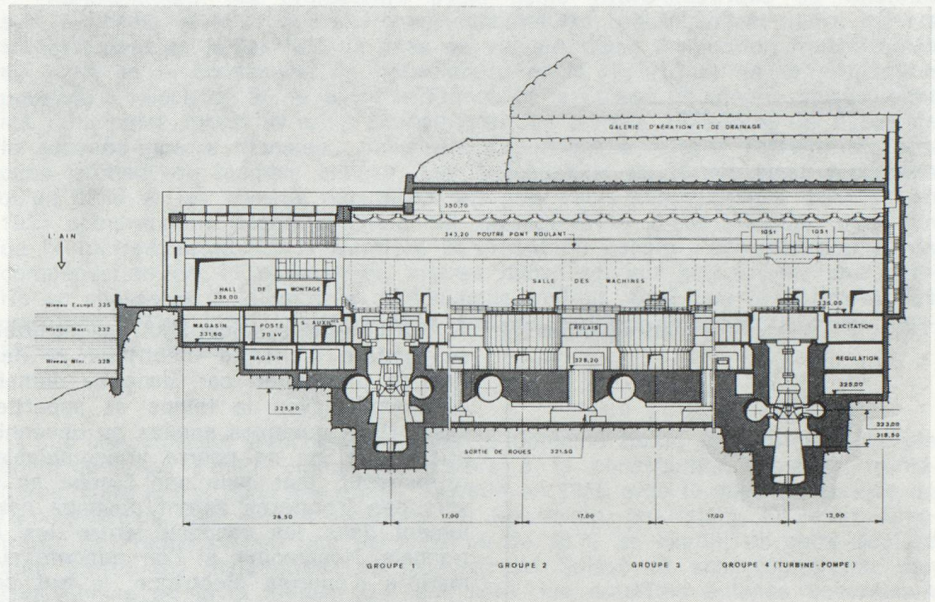
Vouglans : Barrage et usine, vue aval.

Une autre application du pompage consiste à installer à côté de groupes classiques associés à un réservoir saisonnier des groupes réversibles qui, la nuit ou le week-end, repompent une partie du débit utilisé le jour et augmentent artificiellement la capacité du réservoir ; c'est ainsi qu'ont été complétés les équipements des usines de lac de Vouglans (1 groupe de 62 MW, mise en service 1973) et de Sainte-Croix (1 groupe de 55 MW, mise en service 1975).

Le projet de Grand'Maison, envisagé pour 1978, ira plus loin dans cette voie et combinera sous 900 m de chute les trois types de pompage : journalier, hebdomadaire et saisonnier. Le lac aura $200 \times 10^6 \text{ m}^3$ de capacité à l'altitude 1 700 et la puissance en pompes-turbines sera de 1 200 MW.

Enfin, un autre procédé intéressant de transfert journalier d'énergie consiste à stocker la nuit de l'air comprimé dans le sol avec compensation hydraulique de la pression et à l'utiliser le jour pour alimenter une turbine à gaz : c'est le « stockage hydropneumatique » dont une réalisation est actuellement à l'étude pour la Bretagne.

On pourrait pousser plus loin l'énumération de ces projets ; nous en retiendrons simplement, comme conclusion, qu'au moment même où l'hydroélectricité traditionnelle subit la récession que l'on sait, les aménagements de pompage offrent par leur grande variété aux ingénieurs et constructeurs un nouveau et séduisant champ d'activité créatrice.



Vouglans : coupe usine.

Caractéristiques des usines de pompage en France avec groupes réversibles

Nom de l'usine	Réservoirs			Hauteur de chute brute maximale (m)	Groupes		Constructeurs		Date de mise en service
	Volume total		Volume utilisé au pomp. (10^6 m^3)		Nombre et type	Puis. unit. (MW)	Pompe-Turbine	Alternateur moteur	
	Sup. (10^6 m^3)	Inf. (10^6 m^3)							
Rance	Marémotrice			11	24 B	10	Consortium français		1966
Vouglans	(E) 605	(E) 1,6	1,0	100	1 F (1)	62	CAFL	A	1973
Revin	(A) 8,1	(A) 8,7	7,0	246	4 F	198	NB-SFAC	A JS	1974
Sainte-Croix	(E) 767	(E) 18,6	8,0	78	1 F (2)	55	A CL	CEM	1975
La Coche	(A) 2,0	(E) 0,4	2,0	931	4 F (3)	80	V (2 F) N (2 F)		75-76
Arc-Isère	(A) 4,7	(A) 3,2	3,2	260	2 F	240			1978
Montezic	(A) 30	(E) 56	30	423	(3 F)	285			78-79

RÉSERVOIRS :

- (E) existant.
- (A) à créer.

GROUPES :

- F pompe-turbine Francis verticale.
- B groupe bulbe réversible.
- (1) En plus de 3 groupes classiques (CAFL, A).
- (2) En plus de 1 groupe classique (CAFL, CEM).
- (3) Pompe à 5 étages réversible.

CONSTRUCTEURS :

- A = Alsthom.
- V = Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey, Bergeron.
- CAFL = C. des Forges et Ateliers de la Loire.
- CEM = C. Electro-Mécanique.
- CL = Creusot-Loire.
- JS = Jeumont-Schneider.
- N = Neyrpic.
- SFAC = Société des Forges et Ateliers du Creusot.