

<b>Zeitschrift:</b>	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
<b>Band:</b>	87 (1995)
<b>Heft:</b>	3-4
<b>Artikel:</b>	La régulation en chaîne des aménagements du Rhône français de la frontière suisse à la mer
<b>Autor:</b>	Lagoutte, Jean-Robert
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-940400">https://doi.org/10.5169/seals-940400</a>

### 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:** 23.02.2026

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

# *La régulation en chaîne des aménagements du Rhône français de la frontière suisse à la mer*

Jean-Robert Lagoutte

## Résumé

*La Compagnie Nationale du Rhône, créée en 1934, a eu pour mission d'aménager le Rhône au triple point de vue: production d'énergie, navigation et irrigation.*

*L'ensemble des 20 aménagements répartis sur 21 paliers comprend actuellement 18 centrales, 24 barrages et 16 écluses.*

*La totalité de la chaîne d'aménagements fonctionne automatiquement sans personnel de surveillance local permanent. L'architecture du système de conduite automatique est articulée autour de deux postes centraux permettant de superviser les 530 km du fleuve et calculateurs dans chaque aménagement pouvant être autonomes.*

*Suivant les conditions hydrauliques, les logiciels de régulation optimisent la production d'énergie ou assurent la tenue d'un niveau conformément à une consigne d'exploitation.*

*La régulation automatique prend en compte les différentes contraintes inhérentes à ces aménagements à buts multiples.*

## *Die Kettenregelung der Staustufen der französischen Rhone von der Schweizer Grenze bis ans Meer*

### *Zusammenfassung*

*Die im Jahre 1934 gegründete Compagnie Nationale du Rhône hatte es zur Aufgabe, die Rhone von einem dreifachen Gesichtspunkt her auszubauen: zur Energieproduktion, Schiffahrt und Bewässerung.*

*Der Komplex der 20 Bauwerke, die sich über 21 Stufen erstrecken, umfasst derzeit 18 Kraftwerke, 24 Wehre und 16 Schleusen.*

*Die gesamte Staustufenkette funktioniert selbsttätig, ohne ständiges, örtliches Überwachungspersonal. Die Architektur des automatischen Steuersystems geht von zwei Zentralposten zur Datensteuerung aus, wodurch 530 km des Flusses überwacht werden können, sowie von Rechnern in jedem Bauwerk, die unabhängig arbeiten können.*

*Je nach den hydraulischen Bedingungen optimieren die Regelungsprogramme die Energieproduktion oder gewährleisten die Einhaltung des Wasserspiegels gemäss Anleitung.*

*Die Regelungstechnik berücksichtigt die verschiedenen Einschränkungen, denen diese Bauwerke mit ihren vielfältigen Zweckbestimmungen unterliegen.*

## *1. Présentation de la Compagnie Nationale du Rhône*

L'idée de l'aménagement du Rhône date du début du siècle. Vers les années 1900, des gens à Paris pensaient réaliser une centrale hydroélectrique sur la partie amont du fleuve, à Génissiat, pour alimenter en électricité la ville de Paris. La ville lumière avait besoin d'énergie. Dans le même

temps, dans les territoires qui bordent la vallée du Rhône, des élus locaux se préoccupaient de l'aménagement du fleuve, en particulier pour y développer la navigation et pour irriguer les plaines de la zone méditerranéenne du Rhône. Il y a donc eu en ce début du siècle un grand brassage d'idées qui a abouti en 1921 à la promulgation d'une loi: la loi du Rhône. Cette loi disait qu'il fallait aménager d'une façon concertée le Rhône pour la production d'électricité, pour l'amélioration de la navigation, et pour le développement de l'irrigation des zones agricoles. Pour ce faire, il fallait créer un organisme.

Des années passèrent encore, des années de préétudes, de discussions, de polémiques qui aboutirent en 1933 à la création officielle de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). La Compagnie a eu pour mission de réaliser des aménagements rentables, mais aussi comme obligation de réinvestir tous les profits tirés de l'exploitation hydroélectrique pour développer la navigation et l'irrigation. La Compagnie s'est fixée dès l'origine un schéma directeur pour aménager le Rhône entre la Suisse et la Méditerranée. Le résultat de cette action est la presque réalisation d'une vingtaine d'aménagements :

- 8 aménagements<sup>1</sup> en amont de Lyon jusqu'à la frontière suisse: le Haut-Rhône.
- 12 aménagements en aval de Lyon jusqu'à la Méditerranée: le Bas-Rhône.

La CNR est également concessionnaire de l'aménagement et de l'exploitation de la liaison fluviale à grand gabarit entre la Saône et le Rhin. Dans le cadre de ses concessions la CNR assure les rôles de maître d'ouvrage, de maître d'œuvre et d'exploitant. Forte de son expérience, la CNR a développé une activité d'ingénierie dans le domaine de l'aménagement fluvial (conception, réalisation, environnement, gestion).

<sup>1</sup> Six aménagements sont réalisés, deux aménagements sont encore en projet.

## *2. Description des aménagements du Rhône*

De Génissiat dont le niveau de la retenue normal est à 330,70 m NGF à la mer, vingt et un paliers sont répartis sur les 530 kilomètres du Rhône français (figure 1). Ces aménagements à buts multiples concernent (figure 2):

- la production d'énergie hydroélectrique,
- la navigation à grand gabarit,
- l'aménagement de zones agricoles et urbaines (irrigation, protection contre les crues, stabilisation des nappes),
- la promotion de zones de loisirs.

A l'exception de trois d'entre eux, la disposition typique de ces aménagements de basse chute (sauf Génissiat) comporte :

- une retenue,
- un barrage de retenue,
- un canal de dérivation,
- un ouvrage combinant la centrale hydroélectrique et l'écluse,
- un canal de fuite.

Les principales caractéristiques des ouvrages sont (figure 3):

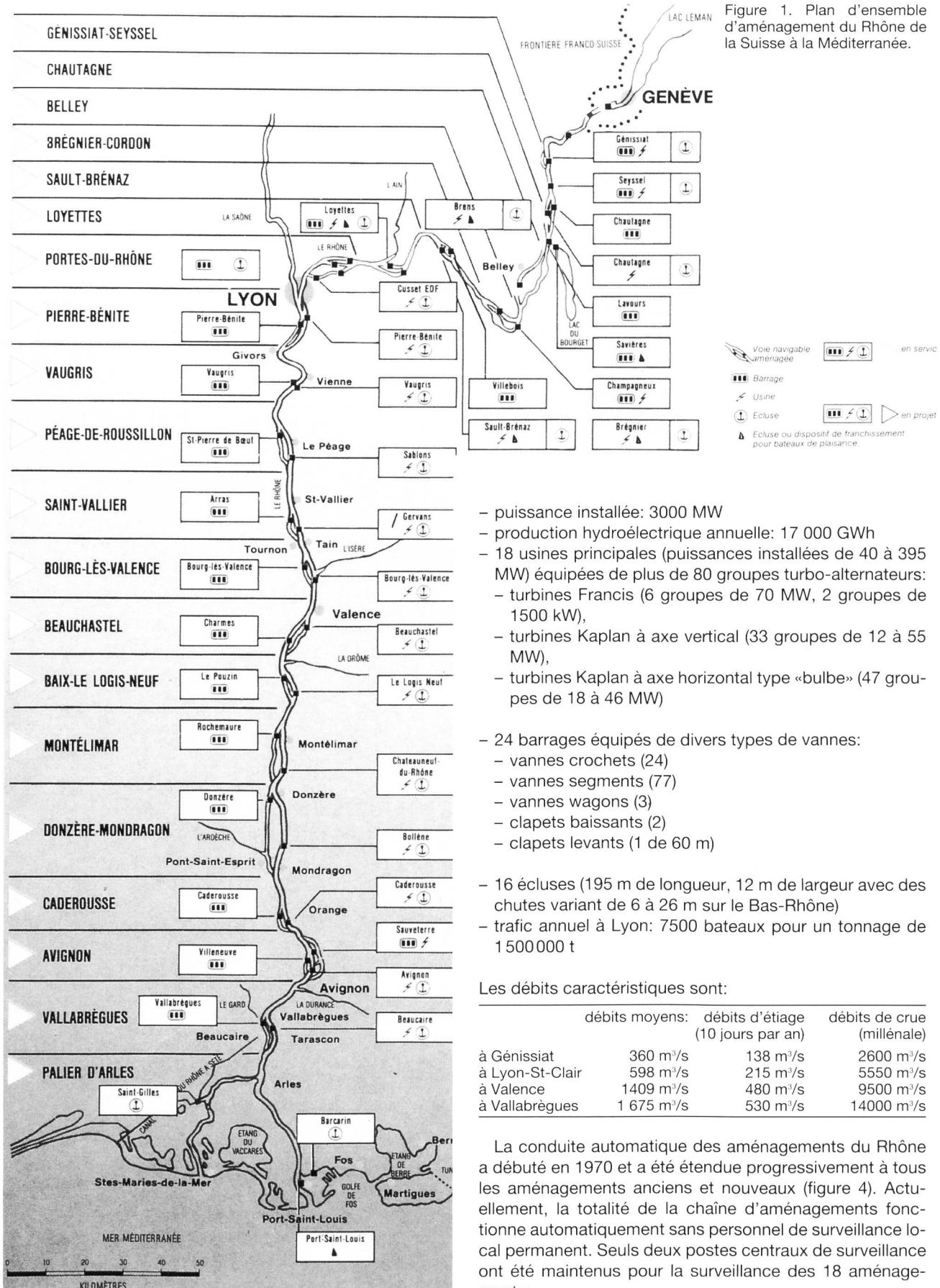


Figure 1. Plan d'ensemble d'aménagement du Rhône de la Suisse à la Méditerranée.

- puissance installée: 3000 MW
- production hydroélectrique annuelle: 17 000 GWh
- 18 usines principales (puissances installées de 40 à 395 MW) équipées de plus de 80 groupes turbo-alternateurs:
  - turbines Francis (6 groupes de 70 MW, 2 groupes de 1500 kW),
  - turbines Kaplan à axe vertical (33 groupes de 12 à 55 MW),
  - turbines Kaplan à axe horizontal type «bulbe» (47 groupes de 18 à 46 MW)
- 24 barrages équipés de divers types de vannes:
  - vannes crochets (24)
  - vannes segments (77)
  - vannes wagons (3)
  - clapets baissants (2)
  - clapets levants (1 de 60 m)
- 16 écluses (195 m de longueur, 12 m de largeur avec des chutes variant de 6 à 26 m sur le Bas-Rhône)
- trafic annuel à Lyon: 7500 bateaux pour un tonnage de 1 500 000 t

Les débits caractéristiques sont:

	débits moyens: (10 jours par an)	débits d'étiage (10 jours par an)	débits de crue (millénale)
à Génissiat	360 m <sup>3</sup> /s	138 m <sup>3</sup> /s	2600 m <sup>3</sup> /s
à Lyon-St-Clair	598 m <sup>3</sup> /s	215 m <sup>3</sup> /s	5550 m <sup>3</sup> /s
à Valence	1409 m <sup>3</sup> /s	480 m <sup>3</sup> /s	9500 m <sup>3</sup> /s
à Vallabregues	1 675 m <sup>3</sup> /s	530 m <sup>3</sup> /s	14000 m <sup>3</sup> /s

La conduite automatique des aménagements du Rhône a débuté en 1970 et a été étendue progressivement à tous les aménagements anciens et nouveaux (figure 4). Actuellement, la totalité de la chaîne d'aménagements fonctionne automatiquement sans personnel de surveillance local permanent. Seuls deux postes centraux de surveillance ont été maintenus pour la surveillance des 18 aménagements:

- un poste de surveillance pour le Haut-Rhône à Génissiat,
- un poste de surveillance pour le Bas-Rhône à Chateauneuf-du-Rhône.

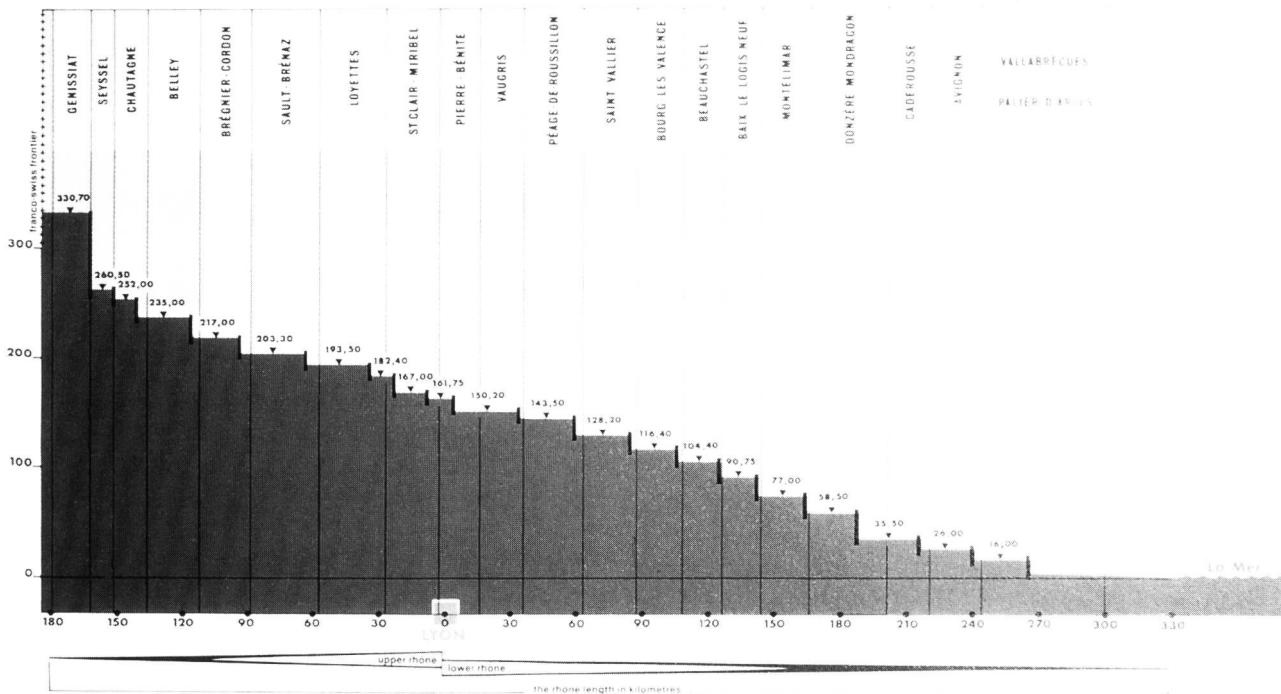


Figure 2. Profil au long du Rhône après l'aménagement.

### 3. Raisons de l'automatisation du Rhône

Trois raisons majeures sont à l'origine de l'automatisation des aménagements du Rhône:

- la production d'énergie,
- le passage des crues,
- la raison sociale.

#### 3.1 La production d'énergie

Le souci de valoriser la production des aménagements du Rhône a conduit la CNR à développer des modes de fonctionnement qui permettent d'amplifier artificiellement et temporairement la production d'une chaîne d'aménagement, c'est le fonctionnement en programme de débit qui consiste à imposer des débits à chaque aménagement à des moments prédéterminés de la journée.

Sur le Rhône, par la pratique de ce mode de fonctionnement accompagné d'un léger destockage des retenues, il est possible de disposer, dans des conditions optimales, d'un supplément de puissance de l'ordre de 800 MW pendant les heures pleines.

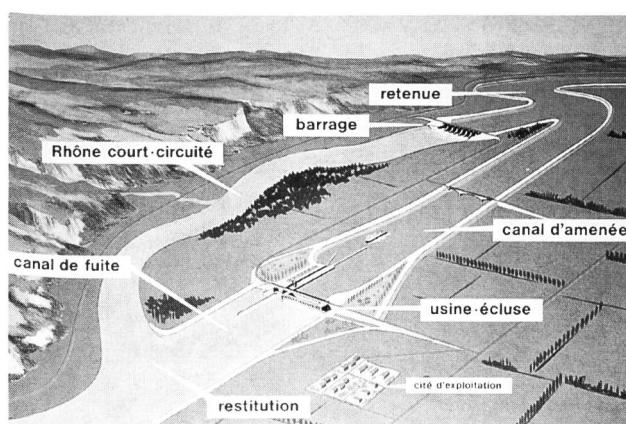


Figure 3. Disposition typique des aménagements à basse chute sur le Rhône (sauf Génissiat).

Le couplage hydraulique étroit d'aménagements disposés en série sur un même fleuve impose une réalisation stricte de ces programmes de débit.

Les premiers essais d'exploitation en manuel ont montré la difficulté de réaliser un tel mode de fonctionnement car l'opérateur a toujours tendance à interpréter les consignes qui lui sont données et il perd ses repères traditionnels qui sont le maintien d'un niveau constant en un point de consigne donné. C'est une des raisons pour laquelle a été développé un système de régulation complètement automatique.

#### 3.2 Le passage des crues

Au fur et à mesure de l'augmentation du nombre des aménagements en série, on constate une accélération du transfert des crues du fait de l'amélioration des conditions d'écoulement et la disparition de facteurs d'amortissement (rescindement de berges, zones canalisées).

Or l'existence d'affluents présentant des gradients de crue élevés (400 à 500 m<sup>3</sup>/sh), l'absence de possibilité importante d'accumulation et la présence de populations riveraines denses imposent une grande vigilance dans le suivi des crues et dans l'exécution du transfert des débits.

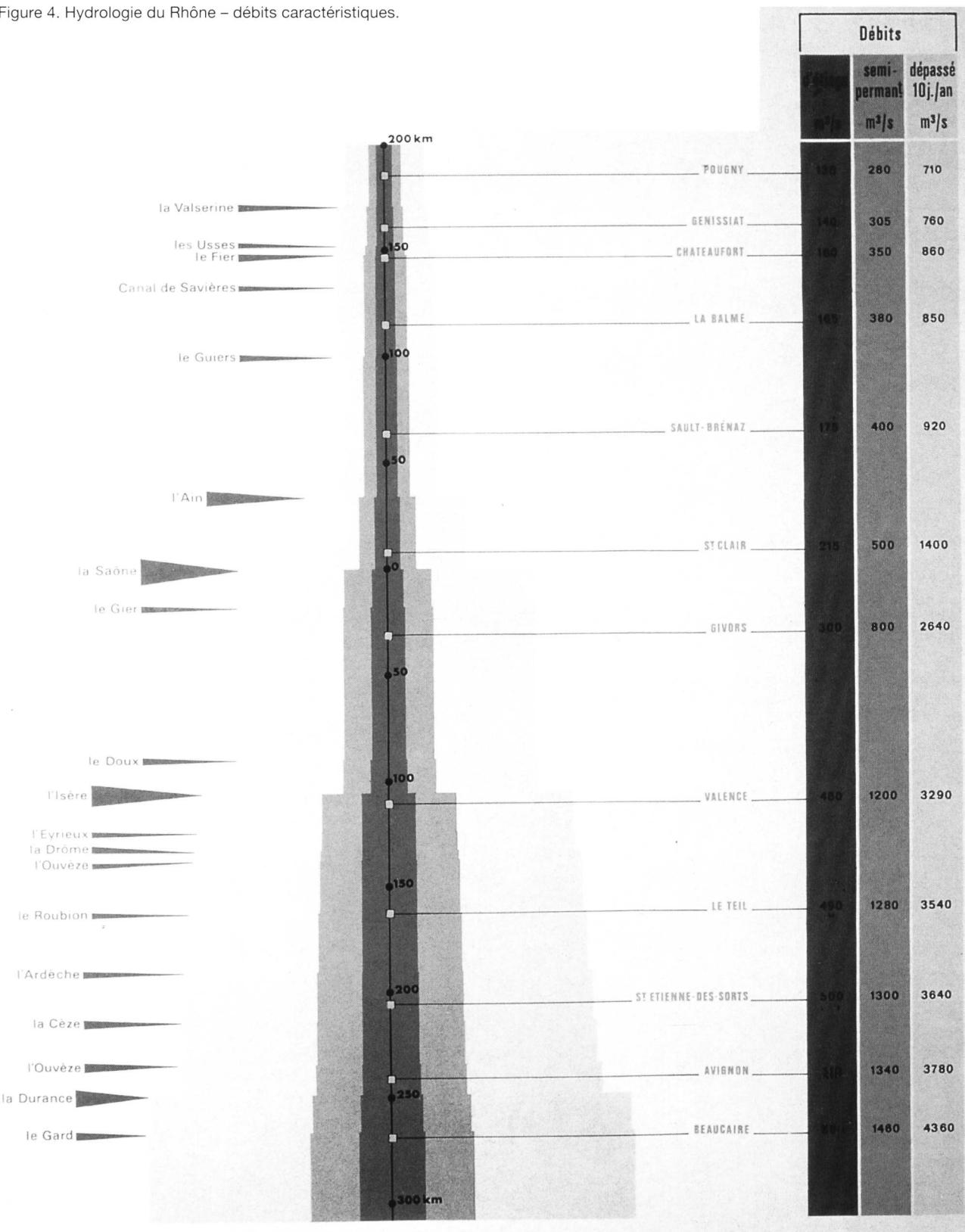
Grâce à une gestion «subtile» des lois de consigne et à une gestion optimale des champs d'inondation, il a été possible par la conduite automatique de retrouver des objectifs imposés par les cahiers des charges et difficiles à maintenir en conduite manuelle, à savoir:

- non amplification des débits de crue,
- non augmentation des gradients de crue,
- non accélération de la propagation des crues.

#### 3.3 La raison sociale

Des préoccupations d'ordre économique et social tendaient à la réduction voir à la suppression des postes de quart fastidieux. L'introduction de la conduite automatique a constitué une révolution dans l'exploitation traditionnelle des aménagements hydroélectriques. Jusque dans les années 1960, l'exploitation d'un aménagement de grande

Figure 4. Hydrologie du Rhône – débits caractéristiques.



taille exigeait en permanence la présence de cinq surveillants:

- 2 surveillants en salle des machines,
- 2 surveillants en salle de commande,
- 1 surveillant au barrage.

Soit un effectif d'une vingtaine de personnes affectées 24 heures sur 24 à la surveillance et à la conduite d'un

aménagement. Etendu à l'échelle de la vallée du Rhône, ce serait aujourd'hui près de 400 postes de surveillants pour 20 aménagements. En fait, aujourd'hui, il n'y a plus personne ni en salle des machines, ni en salle de commande, ni au barrage, il n'y a plus de personnel affecté à la conduite dans les aménagements. Seuls deux postes centraux se partagent la surveillance du fleuve entre la Suisse et la Méditerranée, ce qui représente un effectif d'une douzaine de personnes.

Il faut toutefois noter que cette réduction importante de main-d'œuvre de moindre qualification a été partiellement compensée par la nécessité de mettre en place des équipes de grande technicité pour assurer la maintenance logicielle et matérielle des équipements d'automatisme.

#### 4. Contraintes imposées à l'automatisation

S'agissant d'aménagements à buts multiples, les problèmes posés à la régulation automatique résultent de compromis à trouver entre différentes contraintes dont on peut citer les principales:

- contraintes dues au caractère du fleuve:
  - crues de fortes amplitudes (rapport supérieur à 20 entre les débits d'étiage et les crues millénaires),
  - crues brutales de certains affluents (par exemple dans les Cévennes, gradient de 500 à 800 m<sup>3</sup>/sh).
- contraintes dues à la nature des aménagements:
  - aménagement au fil de l'eau avec des retenues à faible capacité en regard des débits les traversant,
  - aménagements en chaîne qui peuvent amplifier les variations de débit et qui subissent les répercussions d'incidents amont,
  - aménagements partiellement canalisés et qui présentent des singularités topographiques, ce qui entraîne une non-linéarité du système hydraulique,
  - aménagements équipés de centrales hydroélectriques.
- contraintes dues aux usagers du fleuve:
  - niveaux minimum pour la navigation (mouillage), pour les prises d'eau, pour le maintien des plans d'eau des zones de loisirs,
  - niveaux maximum pour la protection contre les inondations, pour la navigation (tirant d'air),
  - débit minimum exigé pour le refroidissement des centrales nucléaires.
- contraintes dues aux modes d'exploitation:
  - diversité des modes d'exploitation: fil de l'eau, programme de débit, pointe, réglage de fréquence, situation de crue,
  - consignes à plusieurs points de réglage,
  - consignes statiques et dynamiques de crues parfois complexes; la conduite reste automatique jusqu'aux fortes crues.
- contraintes dues aux incertitudes sur la connaissance des systèmes hydrauliques à régler:
  - débits erronés,
  - niveaux invalidés.

Cette diversité de contraintes oblige à mettre en place une régulation automatique perfectionnée pour maîtriser les diverses situations qui peuvent se présenter.

La conception et la mise au point de la régulation automatique des aménagements ont recours à l'utilisation de modèles mathématiques dynamiques simulant le comportement de la retenue en régime d'écoulement non-permanent.

#### 5. Architecture du système de conduite automatique du Rhône

Dans la conception de l'automatisation d'une chaîne d'aménagements, la recherche de la prééminence d'un

poste central permet d'assurer pour certains modes de fonctionnement une excellente coordination. Par contre, la dépendance qui en résulte pour les aménagements locaux est néfaste pour la garantie de la sécurité des biens et des personnes en cas d'isolement toujours possible par rapport au poste central.

La sécurité hydraulique nécessite de disposer de moyens de commande au plus près des ouvrages à gérer pour réaliser les fonctions de sécurité imposées par un environnement habité dense. C'est pourquoi une des grandes idées directrices de cette automatisation du fleuve a été de réaliser une automatisation décentralisée. Dans chaque aménagement, on trouve un calculateur qui est capable de conduire l'aménagement de manière tout à fait autonome. C'est de l'autogestion, mais sous la haute surveillance d'un poste central.

La structure du système de conduite automatique d'une chaîne d'aménagements est bâtie selon la structure suivante:

- un poste central dont le rôle est d'assurer la coordination des ordres globaux de fonctionnement adressés à chaque aménagement et de surveiller le comportement et la gestion de ces aménagements;
- dans chaque aménagement, un calculateur d'aménagement qui a pour responsabilité d'exécuter au mieux des consignes élaborées par le poste central tout en se réservant la possibilité de reprendre une gestion autonome de l'aménagement lorsque les contraintes de sécurité sont en jeu et lorsque l'état de crue est déclaré.
- à côté du calculateur d'aménagement, un dispositif dit de sécurité intrinsèque, totalement indépendant du système de conduite automatique, assure la couverture de tout dysfonctionnement imprévisible survenant dans le système de conduite automatique (défaut matériel).

Ces principes sont rigoureusement appliqués sur tout le Rhône.

De plus, sur le Haut-Rhône le poste central est secouru par un poste de secours «PCS» assurant les fonctions principales. Le calculateur d'aménagement est quant à lui secouru par un poste de secours «PS» qui permet de conduire

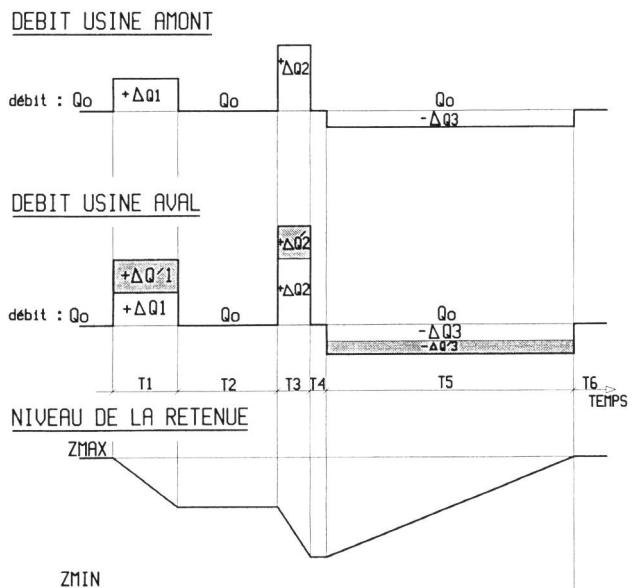


Figure 5. Principe d'une écluse – évolution du niveau en amont et en aval.

re l'aménagement en débit imposé jusqu'à la saturation de la centrale (pas de transfert et de répartition de débit au barrage).

La mise en place des systèmes de conduite automatique s'est déroulée entre 1970 et 1983 sur le Bas-Rhône. Les logiciels et les matériels sont assez hétérogènes sur cette partie du Rhône. L'automatisation du Haut-Rhône a été étudiée à la fin des années 70 et d'une manière globale pour l'ensemble des 7 aménagements (dont Loyettes) avec une homogénéisation des logiciels et matériels la plus étendue possible. Le contrôle-commande des organes est assuré en grande partie par des automates programmables.

La suppression du personnel de quart a engendré la réalisation d'un système de diffusion d'alarmes. Celui-ci appelle le personnel d'astreinte présent dans les ouvrages pour assurer la maintenance et l'entretien pendant les heures ouvrables ou à domicile dans la cité d'exploitation en dehors de ces heures. Sur le Haut-Rhône une équipe d'astreinte a en charge deux aménagements, soit deux centrales plus deux barrages parfois distants de plusieurs dizaines de kilomètres.

## 6. Les régulations de niveaux automatiques des retenues

Les calculateurs de conduite situés dans chacun des aménagements assurent la régulation du niveau de chacune des retenues. Un logiciel détermine le débit objectif à faire sortir de l'aménagement en respectant les objectifs de sécurité et de production d'énergie. On distingue deux modes de régulation qui diffèrent par les objectifs à atteindre:

- la modulation de débit,
- la régulation de niveau.

### 6.1 La modulation de débit

Dans ce mode de régulation, l'objectif prioritaire est la production d'énergie. Le niveau de la retenue peut évoluer librement dans une zone pré-déterminée (marnage), le débit à réaliser est fixé par l'opérateur du poste central en relation avec les mouvements d'énergie (programme Q [7]).

Sur le Bas-Rhône, ce type de modulation est appelé éclusée. En prélevant une partie du volume d'eau stockée dans chaque retenue, il est alors possible de faire une surpuissance sur l'ensemble de la chaîne: ce sont des éclusées cumulatives. La surpuissance réalisée, la retenue est alors exploitée à niveau bas au fil de l'eau (régulation de niveau sur une consigne basse). A la période de faible demande d'énergie, le volume d'eau déstocké est reconstitué, le niveau est remonté (rétenzione) en suivant une consigne évolutive en fonction du temps qui lui permet d'atteindre sa valeur de consigne haute à échéance d'un temps donné. Ce fonctionnement en éclusée permet des surpuissances de plusieurs centaines de MW (800 MW théoriquement).

Sur le Haut-Rhône, la modulation de débit est permanente (figure 5). Celle-ci est basée sur un programme de débit Q (T) renouvelé de jour en jour sans qu'il y ait interruption de programme. Ce fonctionnement en programme de débit est interrompu automatiquement par le poste de conduite local si le niveau sort du domaine autorisé ou en cas de déclaration de crue ou sur demande de l'opérateur.

### 6.2 La régulation de niveau

Dans ce mode de fonctionnement, l'objectif prioritaire est la tenue d'un niveau en fonction d'une consigne qui peut être constante ou variable suivant le débit du fleuve et suivant les aménagements. La régulation est basée soit sur un PID (proportionnel, intégral, dérivé) soit sur un correcteur à réponse plate.

#### 6.2.1 La régulation par PID

Le débit à sortir de l'aménagement est calculé en fonction:

- de la variation du niveau par rapport à la variation de consigne (terme proportionnel)
- de l'écart du niveau par rapport à sa consigne (terme intégral)
- de la variation du débit entrant (terme dérivé ou plus exactement anticipation).

#### 6.2.2 La régulation par correcteur à réponse plate

Cette méthode utilisée sur quelques aménagements du Bas-Rhône s'appuie sur quelques algorithmes mathématiques et une paramétrisation assez poussée de la retenue. Pour simplifier, elle peut être schématisée par une régulation PID classique où seul le terme proportionnel est élaboré plus finement par ces algorithmes à partir d'états présents et passés de la retenue. Un terme «intégral» permet d'annuler l'écart à la consigne.

## 7. Les automatisations futures

### 7.1 Le renouvellement des automatismes de conduite du Bas-Rhône

L'obsolescence des matériels d'automatisme du Bas-Rhône, la difficulté d'assurer la maintenance matérielle (les pièces détachées n'étant plus disponibles) et la maintenance logicielle (manque de place «mémoire») rendent nécessaire le renouvellement des automatismes de conduite. Ce projet appelé «Rhône 2000» dont les études sont menées conjointement par EDF et CNR a débuté en 1991, la mise en service devant être totalement terminée au début du siècle prochain. L'architecture matérielle reposera sur un poste central PC de PHV (Poste Hydraulique de Vallée) qui remplacera l'actuel PSH de Chateauneuf du Rhône et sur des postes d'aménagement «PA».

Contrairement à l'architecture actuelle et pour être conforme aux recommandations de la Commission SEB (Sécurité d'Exploitation des Barrages) chaque aménagement disposera d'un PA au barrage et d'un PA à la centrale, ceci afin d'avoir le calculateur de conduite le plus près possible des organes à commander sans être tributaire de liaisons de télétransmissions. Cette dualité des PA dans un même aménagement pose par contre le problème de la dualité des logiciels de régulation de niveaux, deux régulations actives sur une même retenue ne pouvant être envisagées. Le rôle du PC de PHV est de permettre la surveillance des aménagements en tout temps et d'optimiser la production d'énergie en fournissant à tout moment aux services de mouvements d'énergie la réserve énergétique disponible sur l'ensemble du Bas-Rhône.

Le renouvellement de ces automatisations se justifie pleinement au point de vue économique. On estime, suivant la méthode du coût global, que le retour d'investissement a lieu en cinq ans environ. En effet, pour un aménagement, le coût d'investissement global est estimé à 10000 KFF alors que celui d'un service de quart est d'environ 2500 KFF par an, auquel il faut ajouter le coût de la maintenance soit 400 KFF/An (valeur en francs français constants 1992).

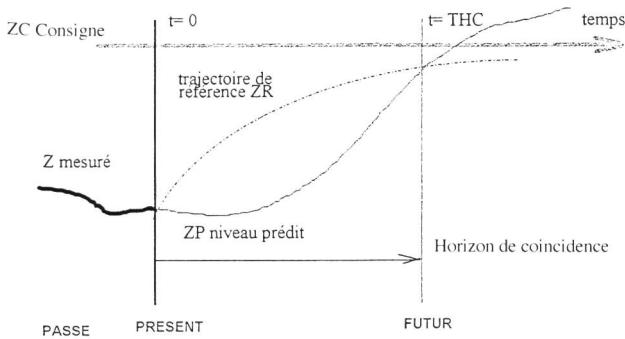


Figure 6. Principe de la commande prédictive.

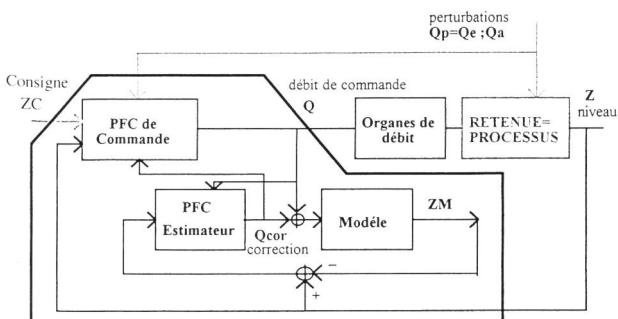


Figure 7. Schéma de la commande prédictive type PFC à modèle interne non linéaire.

## 7.2 Les nouvelles régulations

### 7.2.1 Le PID auto-adaptatif

Les calculateurs PA en service actuellement sur l'ensemble du Rhône ne possèdent pas de disque dur, leurs performances ne permettent pas de faire «tourner» des modèles mathématiques des retenues. Les coefficients du correcteur PID ont été élaborés lors des études par des simulations et sont fixes quel que soit l'état de la retenue (de l'étiage au plus fortes crues). Ainsi, ce régulateur devant être satisfaisant sur toute la gamme du débit il n'est pas optimisé.

De nos jours, il est beaucoup plus aisément d'intégrer des logiciels complexes comme les modèles mathématiques des aménagements. Ces modèles «embarqués» qui tournent en parallèle avec la régulation donnent une image de la retenue réelle. Des simulations peuvent être lancées à tout moment. Les résultats de ces simulations automatiques permettent de déterminer les grandeurs caractéristiques de la retenue qui à leur tour permettent de trouver les coefficients PID optimum pour une situation donnée. C'est le PID auto-adaptatif. Ce type de PID est utilisé dans les régulations du Rhône-Genevois.

### 7.2.2 La régulation par commande prédictive

L'essor des outils mathématiques tant logiciels que matériels, la possibilité d'embarquer sur calculateur le modèle mathématique de retenue hydraulique, nous laisse envisager des résultats particulièrement prometteurs avec la «commande prédictive» qui a déjà fait ses preuves en industrie. Les principaux points forts de cette commande sont:

- l'optimisation de la commande à partir du modèle embarqué qui permet l'accès à la prédition (le futur).
- un temps de réponse nettement plus court que celui du PID, sans perdre en stabilité.
- la prise en compte de contraintes diverses: contraintes de niveaux en tout point de la retenue correspondant à

un profil du modèle, contraintes de vitesses de manœuvre, contraintes de réponses monotones en débit...

- le réglage sur des critères de résultats faisant appel à des notions d'expertise d'exploitation et non plus sur des choix de coefficients réservés aux seuls automaticiens.

Le principe du calcul prédictif fait l'objet de la figure 6.

La commande est celle qui minimise l'écart ( $ZR-ZP$ ) sur l'horizon de coïncidence HC. A chaque pas de régulation, ce calcul est renouvelé; la convergence vers la consigne est ainsi progressive.

Les premiers résultats de simulations appliquées à l'aménagement de Logis-Neuf (Bas-Rhône) sont concluants. La comparaison PID/Prédictif sur différents cas d'études de base met en évidence les performances et donc l'intérêt pour cette nouvelle régulation par commande prédictive.

La commande prédictive diminue le temps de réponse, avec une évolution très propre du niveau. Bien sûr, cette rapidité se fait au détriment d'une action ferme sur le débit de commande, mais le choix des paramètres de réglage nous permet toutes latitudes pour la forme de réponses jusqu'à retrouver un comportement éventuellement aussi lent qu'avec le PID.

## 8. Conclusion

Après plusieurs années d'exploitation automatique, dix ans sur le Haut-Rhône et une vingtaine d'années sur le Bas-Rhône, on peut dire que l'automatisation de la conduite des aménagements du Rhône français est une réussite.

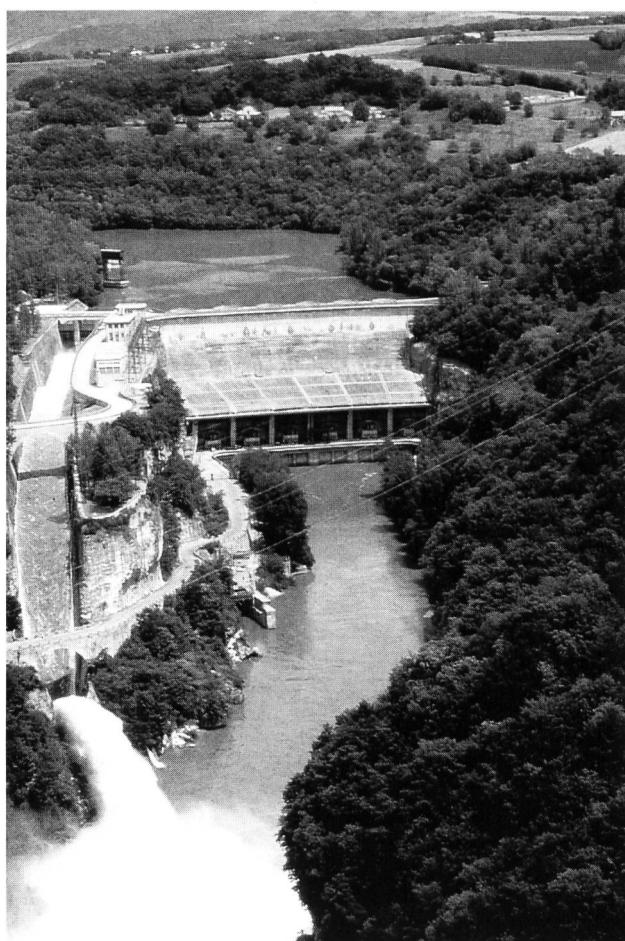


Figure 8. L'aménagement hydroélectrique de Génissiat de la Compagnie Nationale du Rhône.

Forte de ce retour d'expérience et grâce aux performances des matériels informatiques industriels, le renouvellement des automatismes de conduite est étudié avec une approche nouvelle qui donnera encore plus de souplesse dans la gestion de la production d'énergie et améliorera l'écoulement du fleuve en situations perturbées (déclenchements groupes) ou lors des crues du Rhône et/ou de ses affluents.

Adresse de l'auteur: Jean-Robert Lagoutte, Compagnie Nationale du Rhône, CNR, 2 rue André-Bonin, F-69316 Lyon, Cedex 04.

Version écrite d'une conférence de M. J.-R. Lagoutte lors de la Journée technique du 27 octobre 1994 à Genève-Cointrin. Le thème de la journée était «Télécommande et télécontrôle d'usines électriques et de chaînes d'aménagements fluviaux». Organisateur: Association suisse pour l'aménagement des eaux.

## Die Rahmenbedingungen zum Bau von Wasserkraftanlagen

Im Jahr 1991 wurden weltweit rd. 12030 TWh Elektrizität erzeugt und davon 18,5% aus Wasserkraft gewonnen. Der Strom aus Wasserkraft belastet die Umwelt im Vergleich zu dem aus Wärmekraftwerken wenig. Ein Wasserkraftwerk setzt die vorhandene Energie zu mehr als 80% in Elektrizität um; dabei werden keine Ressourcen verbraucht. Außerdem ist die Wasserkraft eine sich stets erneuernde Energieform.

### Wasserkraftreserven

Die weltweiten Wasserkraftreserven liegen bei 13 Mio GWh/a, was etwa einer installierten Kraftwerksleistung von 3 Mio MW entspricht; sie werden in Nordamerika und Europa bereits zwischen 54% in Canada und 94% in Deutschland genutzt; in Asien, Afrika und Lateinamerika sind es dagegen erst etwa 10% (Bild 1).

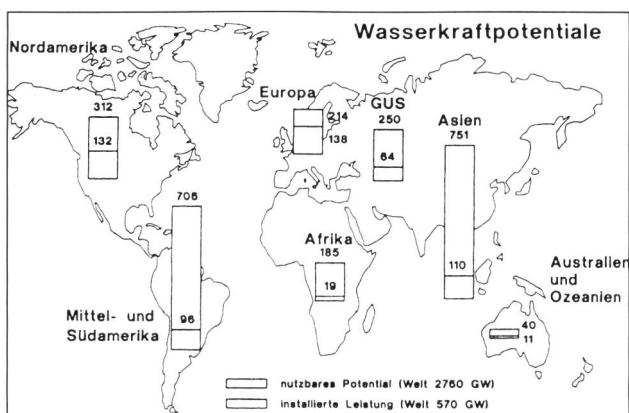


Bild 1. Wasserkraftpotentiale der Welt.

Bis 1995 werden weltweit etwa 20% nutzbar gemacht sein und bis zum Jahr 2015 bis zu 30%. Danach müssten in den nächsten 20 Jahren jährlich Wasserkraftanlagen mit 15 000 MW gebaut werden. Das ist nur zu verwirklichen, wenn dafür die Rahmenbedingungen zielorientiert, umwelt-politisch sinnvoll, sozialpolitisch verträglich und ökonomisch korrekt gestaltet werden. Dazu kommt, dass die Wasserkraft in den Entwicklungsländern auszubauen ist, weil gerade dort der Energiebedarf überdurchschnittlich

steigt und dort überwiegend die noch verfügbaren Wasserkraftreserven liegen.

Industrieländer mit hohen Ansprüchen an Sicherheit und Qualität der Stromversorgung sollten über 3 bis 7% Pumpspeicherleistung verfügen.

### Wasserkraftwerk oder Wärmekraftwerk

Die Entscheidung zwischen dem Bau eines kohlegefeuerten Wärmekraftwerks und der Ausführung als Wasserkraftanlage wird über einen Vergleich getroffen, wobei die Kostenströme der beiden Kraftwerke über Bauzeit, Betrieb und Erneuerung ermittelt und auf einen Gegenwartswert abgezinst werden; gebaut wird dann das Kraftwerk mit dem geringsten Barwert. Ein hoch angesetzter Abzinsungssatz kann sich für die Wasserkraftanlage (hohe Investitionskosten) gegenüber dem Wärmekraftwerk (hohe Betriebskosten) nachteilig auswirken. Er ist aus sozioökologischen Gründen zu verringern, wozu Entwicklungshilfeinstitutionen beitragen sollten.

### Externe Kosten

Die Kostenströme müssen auch die externen Kosten berücksichtigen, wie z.B. bei der nicht regenerativen Elektrizitätserzeugung die Kosten durch Klimabeeinflussung, Bodenübersäuerung, sauren Regen, Denkmalschutz usw., da sonst der Kraftwerksvergleich verfälscht und eine nicht richtige Entscheidung getroffen wird.

In diesem Zusammenhang interessieren die Aufwendungen zur Bekämpfung des Treibhauseffektes: Bei jeder Kilowattstunde (kWh) aus fossilen Brennstoffen entstehen 4 bis 12 N des wichtigsten Treibhausgases CO<sub>2</sub>, zu dessen Ausgleich mindestens 2,50 Fr./kN CO<sub>2</sub> oder 1 bis 2,5 Rappen/kWh aufgewendet werden müssten. Dies ist künftig bei den Kraftwerksvergleichen zu berücksichtigen.

Der Bau von Wasserkraftanlagen beansprucht wie die meisten grossen Investitionsvorhaben auch Land und nimmt damit Einfluss auf die Umwelt. Die notwendige Um-siedlung von Menschen, der Umgang mit Tieren und Pflanzen, die Beeinflussung der Wasserqualität und die Erhaltung von Kulturdenkmälern bedürfen einer sorgfältigen Planung.

Die Wasserkraft wird in der Elektrizitätsversorgung auch in der Zukunft einen bedeutenden Anteil haben. Wie rasch sie ausgebaut und genutzt werden kann, hängt jedoch entscheidend von den durch die Politik vorgegebenen Rahmenbedingungen ab.

BG

### Literatur

Zimmermann, J.: Wasserkraft in der Energiediskussion, FAZ Nr. 242/1994.