

**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:** 81 (1990)

**Heft:** 16

**Artikel:** Variabilité interannuelle de l'énergie hydroélectrique productible en hiver

**Autor:** Gnansounou, E. / Sarlos, G. / Amthauer, E.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-903147>

### **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:** 14.02.2026

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

# Variabilité interannuelle de l'énergie hydroélectrique productible en hiver

E. Gnansounou, G. Sarlos et E. Amthauer

*La production d'électricité d'origine hydraulique varie fortement d'une année à l'autre. L'article suivant présente un modèle élaboré sur la base de l'analyse de nombreux bassins versants, modèle permettant de reproduire les affluents naturels pouvant être exploités en hiver et la dépendance mutuelle des divers bassins versants.*

*Die Wasserkraftproduktion ist beträchtlichen Schwankungen von Jahr zu Jahr unterworfen. In der hier vorgestellten Arbeit wurde aufgrund der Analyse zahlreicher Einzugsgebiete ein Modell erarbeitet, das es gestattet, die natürlichen verwertbaren Zuflüsse im Winterhalbjahr und die Abhängigkeit der einzelnen Einzugsgebiete untereinander nachzubilden.*

## Adresse des auteurs :

Edgard Gnansounou et Prof. Gerard Sarlos, Laboratoire de Systèmes Energétiques (LASEN), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne

Edgar Amthauer, Elektrizitäts-Gesellschaft Laufenburg AG, 4335 Laufenburg

## 1. Introduction

Pour analyser l'adéquation à long terme entre l'offre et la demande d'énergie électrique, on utilise en Suisse une approche probabiliste.

Chaque hiver, le parc des moyens de production d'énergie électrique et les contrats d'importation à moyen et long termes doivent satisfaire la demande d'énergie électrique avec au moins une probabilité de 95%.

L'application d'un tel critère rend nécessaire la détermination de la fonction de distribution de l'énergie électrique productible en hiver. Cette fonction évalue la variabilité interannuelle de l'offre d'énergie électrique à long terme. On la détermine en construisant une fonction de distribution pour chacune des composantes de l'offre et en déduisant, par convolution la fonction de distribution de l'offre totale. Ainsi, l'Union des Centrales Suisses d'Electricité (UCS) détermine par exemple une fonction de distribution pour les centrales nucléaires, une pour l'ensemble du parc hydro-électrique et deux autres fonctions pour les importations d'énergie électrique.

Des améliorations ont été apportées ces dernières années à la détermination de ces fonctions (voir [3]) mais elles ont concerné essentiellement la variabilité de la production des centrales nucléaires.

En ce qui concerne la production hydro-électrique, dans les travaux traitant de cette question, on s'est généralement limité à une approche globale utilisant des données agrégées (voir [3] à [8]).

Les raisons justifiant cette approche sont :

- la taille du parc hydro-électrique suisse : environ 450 centrales en 1990 si on se limite à celles qui ont une puissance de plus de 300 kW ;
- et la complexité des interactions entre différents aménagements.

Ce travail a pour but de contribuer à une meilleure évaluation de la variabilité interannuelle de l'énergie hydro-électrique productible en hiver en Suisse.

## 2. Energie productible en hiver par le parc hydro-électrique : hypothèses et définitions

### 2.1 Hypothèses de travail

Précisons qu'on s'intéresse dans ce travail à l'énergie hydro-électrique productible en hiver compte tenu de la variabilité interannuelle des conditions hydrologiques.

Cette énergie est différente de la production effective laquelle dépend non seulement des conditions météorologiques mais aussi de la situation du marché de l'énergie (contrats à court et moyen termes entre les entreprises suisses d'électricité et celles des pays voisins).

L'énergie hydro-électrique productible en hiver (octobre à mars) est égale à la somme :

- du prélèvement hivernal sur le stockage saisonnier
- et des apports naturels productibles en hiver.

### 2.2 Prélèvement hivernal sur l'accumulation saisonnière

Le prélèvement possible en hiver sur l'accumulation estivale dépend :

- des niveaux de remplissage des réservoirs d'accumulation au début et à la fin de l'hiver et
- de la capacité d'accumulation choisie comme référence à long terme.

Les niveaux de remplissage des réservoirs sont la conséquence de décisions prises par les nombreuses sociétés d'électricité du pays et ne résultent donc pas d'une stratégie concertée.



Ceci conduit à utiliser une approche normative. Dans les travaux de l'UCS, on admet un niveau de remplissage des réservoirs au début de l'hiver correspondant à 93% de la capacité d'accumulation. Quant au niveau à la fin de l'hiver, il est admis à 20% de la capacité pour tenir des conditions d'approvisionnement très variables en avril et en mai d'une année à l'autre.

Ces différentes hypothèses conduisent l'UCS à fixer le prélèvement hivernal sur la réserve saisonnière à 73% de la capacité d'accumulation. Cette valeur est portée à 80% en cas d'approvisionnement critique en hiver.

De ce fait, la fonction de distribution relative à la production hydro-électrique en hiver ne reflète que la variabilité des apports naturels productibles en hiver.

On se limitera dans cet article à la détermination de la fonction de distribution des apports naturels productibles en hiver.

### 2.3 Influence des conditions hydrologiques: la productibilité

L'hydrologie joue un rôle déterminant dans la production d'énergie hydro-électrique. Du fait des conditions hydrologiques, la quantité d'énergie hydro-électrique qu'il est possible de produire peut varier de manière importante d'une année à l'autre.

En toute généralité, pour caractériser les conditions hydrologiques, on utilise le terme hydraulité. L'hydraulité, selon la définition de l'UCPTE, «concerne le phénomène naturel des précipitations atmosphériques et l'écoulement des cours d'eau tels qu'ils se présentent ou se présenteraient en l'absence de toute intervention humaine effective ou projetée».

En matière de production d'énergie électrique, on ne s'intéresse qu'à la part des apports hydrauliques naturels utilisables par les aménagements hydro-électriques eu égard:

- à leurs équipements (capacité des conduites et des réservoirs à accumulation, puissance maximale des turbines), et
- aux débits concédés

On utilise alors les termes d'apports hydrauliques productibles ou de productibilités hydro-électriques.

La productibilité d'un aménagement hydro-électrique pendant une saison donnée (semaine, mois, année, etc.) représente la quantité d'énergie que l'aménagement peut produire en exploitation normale compte tenu des

apports hydrauliques naturels\* qui lui sont parvenus pendant cette saison.

### 2.4 Mode de calcul des productibilités

Les productibilités hydro-électriques sont généralement évaluées de manière indirecte, à partir de la production et des variations de stockage.

- Dans le cas des aménagements hydro-électriques au fil de l'eau, la productibilité pendant une saison est la somme de la production effective et des déversements intervenus par suite de dérangements ou de pannes.
- Dans le cas des aménagements à accumulation, la productibilité se calcule de la manière suivante: soient:

E	: La production effective pendant la saison	(GWh)
A	: le stockage d'apports hydrauliques dans le réservoir	(GWh)
DS	: les prélèvements sur l'accumulation	(GWh)
DV	: les déversements d'apports régulables en exploitation normale ou productibles au fil de l'eau	(GWh)
PM	: l'énergie utilisée pour le pompage d'accumulation	(GWh)
P	: la productibilité hydro-électrique	(GWh)

on a :

$$P = E + A + DV - DS - PM$$

### 2.5 Difficulté d'agréger les séries temporelles de productibilités des différents aménagements

Différents facteurs contribuent à rendre hétérogènes les séries temporelles des productibilités du parc hydro-électrique suisse. Il s'agit essentiellement de l'évolution du parc et des conditions de débit:

- agrandissement, rénovation ou déclassement d'aménagements existants;
- modification des débits équipés ou concédés;
- construction de nouveaux aménagements.

Les données relatives aux productibilités du parc hydro-électrique sont mises à jour chaque année par l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN). Les données sont ajustées par l'OFEN afin de les rapporter à un parc de référence correspondant au parc de la dernière année de la série.

Ainsi, les productibilités mensuelles du parc hydro-électrique suisse sont disponibles à l'OFEN pour la période

1950/51 à l'année en cours et à différents niveaux d'agrégation:

- apports totaux productibles par le parc hydro-électrique avec une désagrégation régionale et sous-régionale;
- apports productibles au fil de l'eau avec la même désagrégation,
- apports régulables par les aménagements à accumulation avec la même désagrégation.

L'analyse de ces données agrégées (voir [1]) a montré qu'elles présentaient des hétérogénéités. Ces hétérogénéités sont dues pour une grande part à la croissance du parc.

Les corrections apportées par l'OFEN pour prolonger les données relatives aux aménagements mis en

service après 1950/51 consistent généralement à utiliser en rétrogression la méthode de la moyenne mobile.

Cette méthode de lissage donne de bons résultats en ce qui concerne la moyenne des productibilités du parc mais tend à sous-estimer leur variance.

En fait, pour compléter les séries relatives aux aménagements mis en service après 1950/51, des analyses plus poussées sont nécessaires tenant compte pour chaque aménagement, des conditions hydrologiques dont il aurait dû bénéficier pendant les années où les données manquent.

Ce genre d'analyse nécessite une bonne connaissance:

- des caractéristiques des bassins versants et
- des débits concédés et équipés des aménagements concernés.

En résumé, la difficulté de quantifier la variabilité interannuelle des productibilités hivernales de l'ensemble du parc hydro-électrique est due essentiellement au fait que les différents aménagements ont été mis en service à des dates différentes. On contourne cette difficulté en ajustant les données existantes au parc actuel, mais les méthodes utilisées tendent à sous-estimer la variabilité des productibilités. L'importance de cette sous-

\* Il n'est pas toujours possible de distinguer les apports naturels de ceux venant d'aménagements situés en amont (cas de Lavey et de Verbois par exemple)



estimation dépend de la contribution, à la variabilité totale, des centrales mises en service après 1950/51.

### 3. Evaluation de la variabilité des apports naturels productibles par le parc en hiver

Les productibilités agrégées au niveau régional présentant des hétérogénéités temporelles, on a dû rechercher des données détaillées au niveau des différents aménagements. Le parc hydro-électrique a été réparti en 197 aménagements compte tenu des informations obtenues. Pour chaque aménagement, on n'a retenu que les données relatives à la période pendant laquelle il était en service.

On obtient ainsi, 197 séries de productibilités hivernales d'inégales longueurs.

Soient:

$X_i$  la variable aléatoire représentant la productibilité hivernale de l'aménagement  $i$

$\bar{X}_i$  la moyenne de  $X_i$

$\sigma_i$  l'écart-type de  $X_i$

$\sigma_{ij}$  la covariance entre les apports naturels productibles en hiver par les aménagements  $i$  et  $j$ :  
 $\sigma_{ij} = \sigma_i^2$

$N$  le nombre total d'aménagements (ici 197)

on obtient:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \bar{X}_i \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} = \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sigma_{ij} \quad (2)$$

où  $\bar{X}$  et  $\sum_{i=1}^N \sigma_i^2$  représentent respectivement la moyenne et la variance des apports naturels productibles en hiver par le parc.

Le tableau I présente les résultats obtenus pour les six grandes régions hydrologiques. On a indiqué entre parenthèses les valeurs publiées par l'OFEN.

On observe que les données publiées sous-estiment la variance des productibilités hivernales du parc de 18% environ, alors que la moyenne obtenue est peu différente de celle publiée par l'OFEN.

### 4. Prise en compte de l'évolution à long terme du parc hydro-électrique

Les valeurs présentées dans le tableau I se réfèrent au parc actuel. Or, pour juger de l'adéquation à long terme de l'offre d'énergie électrique, il est utile d'évaluer l'influence des modifications du parc hydro-électrique sur la variance des productibilités.

Les facteurs d'évolution pouvant affecter la variabilité des apports productibles en hiver sont de deux ordres:

- Modifications des caractéristiques d'aménagements existants (débits équipés, débits concédés, débits minimaux, amélioration des rendements);
- La prise en compte de ces facteurs nécessite un ajustement rigoureux des données relatives à chaque aménagement concerné.
- Construction de nouvelles centrales. Ce cas est traité dans les sections suivantes.

#### 4.1 Méthode utilisée dans les différents travaux relatifs à l'évolution du parc suisse

Soit à ajouter au parc hydro-électrique un aménagement  $k$  dont on a une estimation de la productibilité moyenne  $\bar{X}_k$ .

On cherche à déterminer l'influence du nouvel aménagement sur la variabilité de la productibilité du parc.

La méthode utilisée, notamment dans les travaux de l'UCS, consiste à admettre que le coefficient de variation des productibilités du parc, reste constant d'où:

$$\frac{\sum_{i=1}^{N+1} \bar{X}_i + \bar{X}_k}{\sum_{i=1}^N \bar{X}_i} = C \text{ et}$$

$$\sum_{i=1}^{N+1} \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 = C^2 \bar{X}_k (\bar{X}_k + 2 \sum_{i=1}^N \bar{X}_i)$$

$$= C^2 \bar{X}_k^2 + 2 C^2 \bar{X}_k \sum_{i=1}^N \bar{X}_i \quad (3)$$

avec

$\sum_N$  et  $\sum_{N+1}$  : les écarts-types des apports naturels productibles en hiver respectivement par le parc initial et le parc après addition de la centrale  $k$

$C$  : le coefficient de variation

Ceci revient à admettre implicitement que les apports naturels productibles en hiver par la nouvelle centrale sont parfaitement corrélés avec les apports naturels agrégés productibles en hiver par le parc initial et ont le même coefficient de variation que ces derniers.

Ces hypothèses paraissent trop restrictives.

#### 4.2 Méthode proposée

En fait, l'influence de la nouvelle centrale sur la variabilité du parc est donnée par:

$$\sum_{i=1}^{N+1} \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 = \sigma_k^2 + 2 \sigma_k \sum_{i=1}^N \rho_{k,i} \sigma'_i \quad (4)$$

	Tessin	Grisons	Valais	Versant Nord des Alpes	Plateau	Jura	Total Suisse
Moyenne GWh	818,4 (820,0)	1324,4 (1328,2)	1409,2 (1400,6)	1150,0 (1082,1)	2846,6 (2825,9)	208,1 (208,0)	7756,8 (7664,8)
Ecart-type GWh	282,0 (254,5)	363,1 (314,3)	193,7 (165,5)	192,1 (180,3)	438,9 (438,1)	39,3 (38,5)	1274,4 (1156,9)
Coefficient de variation %	34,5 (31,0)	27,4 (23,7)	13,7 (11,8)	16,7 (16,7)	15,4 (15,5)	18,9 (18,5)	16,4 (15,1)

Tableau I: Variabilité des apports naturels productibles en hiver

avec

$\rho_{k,i}$  : le coefficient de corrélation entre les apports naturels productibles en hiver par l'aménagement  $k$  et ceux productibles en hiver par un aménagement  $i$  quelconque du parc initial.

$\sigma'_i$  : l'écart-type des apports productibles en hiver par un aménagement  $i$  quelconque du parc initial

L'utilisation de l'équation (4) suppose que  $\sigma_k$  et les coefficients de corrélation  $\rho_{k,i}$  soient connus.

## 4.2.1 Evaluation de l'écart-type $\sigma_k$ du nouvel aménagement

Généralement, pendant la conception de l'aménagement, on dispose de données hydrologiques de plusieurs années précédentes permettant d'estimer la productibilité moyenne. Les mêmes données peuvent être utilisées pour évaluer la variance de ces productibilités.

Il s'agit là d'une première estimation qui pourra être précisée après plusieurs années d'exploitation.

Dans le cas où les données existantes ne permettent pas cette estimation, une comparaison avec différents aménagements de même type et bénéficiant de conditions hydrologiques comparables pourra y aider.

## 4.2.2 Evaluation des corrélations

Avec les données disponibles, il n'est généralement pas possible d'estimer les différents coefficients de corrélation. Il est alors nécessaire de faire certaines simplifications. On propose ici deux méthodes, l'une agrégée et l'autre désagrégée du point de vue spatial.

### ● Méthode agrégée

Elle consiste à admettre que:

$$\rho_{i,j} = \rho \quad \forall i,j, \text{ avec } i \neq j \quad (5)$$

Avec les données du parc existant, on détermine  $\rho$  de la manière suivante:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sigma_{ij}}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sigma_i \sigma_j} \quad (6)$$

La valeur de  $\rho$  ainsi obtenue mesure la corrélation «moyenne» entre les apports naturels productibles en hiver par les différents aménagements du parc initial.

On postule que  $\rho$  varie peu à long terme et on en déduit que:

$$\sum_{N+1}^2 - \sum_N^2 \simeq \sigma_k^2 + 2\rho \sigma_k \sum_{i=1}^N \sigma'_i \quad (7)$$

De manière générale, si  $m$  nouveaux aménagements doivent être ajoutés au parc, l'augmentation de variance est donnée par:

$$\sum_{N+m}^2 - \sum_N^2 = \left( \sum_{k=1}^m \sigma_k \right)^2 + 2(\rho-1) \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{j=k+1}^m \sigma_k \sigma_j + 2\rho \left( \sum_{k=1}^m \sigma_k \right) \left( \sum_{i=1}^N \sigma'_i \right) \quad (8)$$

### ● Méthode désagrégée

L'intérêt du modèle agrégé est sa simplicité; on peut l'affiner en tenant compte de l'hétérogénéité spatiale du parc.

En effet, l'analyse des corrélations entre les apports naturels productibles en hiver par les différents aménagements du parc montre l'existence d'une forte hétérogénéité spatiale.

Une meilleure prise en compte des corrélations entre aménagements passe donc par une désagrégation spatiale de la première méthode.

Le parc est réparti en  $R$  régions. Pour chaque région  $r$  on définit:

- un coefficient régional de corrélation  $\rho_r$

$$\rho_r = \frac{\sum_{i=1}^{N_r-1} \sum_{j=i+1}^{N_r} \sigma_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_r-1} \sum_{j=i+1}^{N_r} \sigma_i \sigma_j} \quad (9)$$

- des coefficients inter-régionaux de corrélation

$$\rho_{r,r'} = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_{r'}} \sigma_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_{r'}} \sigma_i \sigma'_j} \quad (10)$$

avec

$N_r$  et  $N_{r'}$  : les nombres d'aménagements du parc initial situés respectivement dans les régions  $r$  et  $r'$ .

$i,j$  : les indices des aménagements du parc initial situés respectivement dans les régions  $r$  et  $r'$

et  $\sigma'_j$  : l'écart-type des apports naturels productibles en hiver par un aménagement  $j$  quelconque de la région  $r'$ .

La prise en compte des corrélations régionales et inter-régionales permet de généraliser la formule (8).

Comme dans le cas du modèle agrégé, on suppose que les coefficients régionaux et interrégionaux de corrélation varient peu à long terme.

Les différents coefficients sont estimés en fonction des données disponi-

bles au moment de l'analyse et sont mis à jour chaque année en tenant compte des données supplémentaires et des modifications touchant au parc initial.

## 4.2.3 Application au parc hydro-électrique de la Suisse

L'application de la méthode agrégée aux données des aménagements hydro-électriques de la Suisse a donné:

$$\rho = 0.54$$

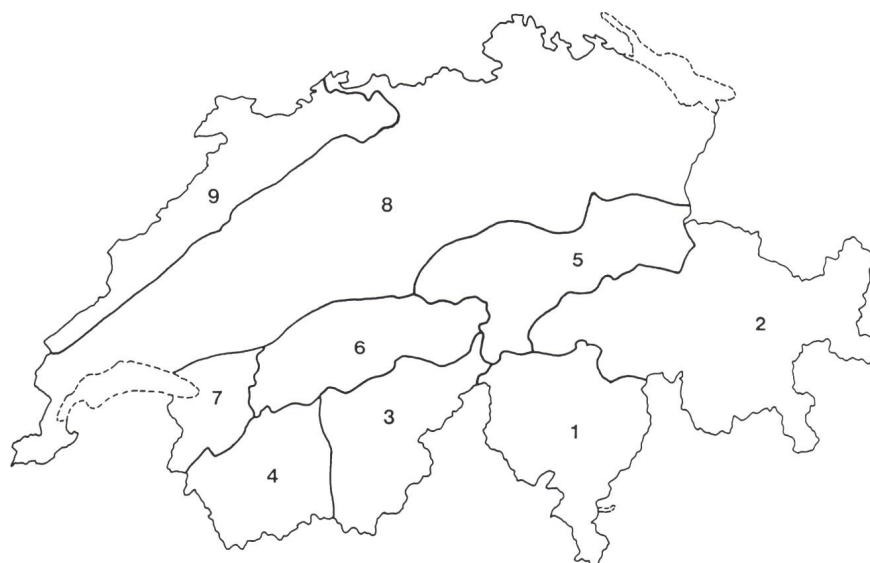
On a d'autre part analysé les corrélations entre les apports productibles en hiver par les différents aménagements.

Notons que ces corrélations ne reflètent pas uniquement les conditions hydrologiques mais également les données constructives des différents aménagements. Si l'influence des conditions climatiques est prédominante, on a des coefficients de corrélation élevés; c'est le cas par exemple au Tessin, dans les Grisons et dans le Plateau.

Des coefficients de corrélation relativement faibles ont été interprétés comme un résultat de la prédominance des particularités des différents aménagements; c'est généralement le cas dans les régions où des bassins versants des aménagements sont à prédominance glaciaire ou nivo-glaciaire, les débits en hiver sont alors beaucoup plus faibles qu'en été et sont très influencés par les contraintes locales. Ce cas se présente dans le Valais et sur le Versant Nord des Alpes.

Enfin, on a cherché à regrouper les différents aménagements en régions, compte tenu de ces corrélations. Les neuf régions suivantes ont pu être identifiées (voir également fig. à la page suivante).



**Figure 1 Régions utilisées**

- 1 Tessin y compris les Vals  
Calancasca et Mesolcina
- 2 Grisons sans les Vals  
Calancasca et Mesolcina
- 3 Haut-Valais
- 4 Bas-Valais

- 5 Glaris, Oberland Saint-Gallois  
Suisse centrale
- 6 Oberland bernois
- 7 Haute Sarine, Chablais vaudois et  
valaisan
- 8 Plateau
- 9 Jura

Leurs corrélations régionales et inter-régionales ont été évaluées en utilisant les données des différents aménagements.

Les moyennes et écarts-types des apports naturels productibles dans ces différentes régions sont présentés dans le tableau II.

Pour illustrer les méthodes proposées, supposons qu'un nouvel aménagement  $k$  doive être ajouté au parc.

Sachant par exemple que:

$$\bar{x}_k = 500 \text{ GWh}$$

Avec la méthode agrégée, on évalue à 10% environ (9,86%) l'augmentation de la variance du fait de l'addition de la nouvelle centrale.

La méthode désagrégée permet de modéliser l'influence de la localisation régionale de l'aménagement sur l'augmentation de la variance.

Si l'on admet, par exemple, que le coefficient de variation des apports naturels productibles par le nouvel

aménagement est le même que celui du parc initial, on a alors:

$$\sigma_k = 82.15 \text{ GWh};$$

Le tableau III donne l'augmentation  $\Delta$  de la variance des apports naturels productibles en hiver par le parc en fonction de la localisation de l'aménagement.

En fait, le coefficient de variation peut beaucoup changer d'un aménagement à l'autre dans une même région et d'une région à l'autre.

D'un point de vue général, les apports naturels productibles en hiver présentent les coefficients de variation les plus élevés au Tessin et dans les Grisons comme l'indique le tableau II.

Pour illustrer la tendance du coefficient de variation à prendre des valeurs différentes d'une région à l'autre et l'influence de ceci sur l'augmentation de la variance, considérons à nouveau l'aménagement  $k$  et admettons maintenant que les apports naturels productibles présentent le même coefficient de variation que celui de la région dans laquelle il est localisé. On obtient les nouvelles valeurs  $\Delta'$  de la variance indiquées dans le tableau III.

A titre de comparaison, l'hypothèse d'une corrélation parfaite avec les apports naturels agrégés productibles par le parc initial aurait donné:  $\Delta = 13,3\%$ .

Il faut noter que l'exemple choisi est avant tout destiné à illustrer l'hétérogénéité régionale du parc hydro-électrique du point de vue de la variabilité des apports productibles en hiver.

Dans la réalité, même à long terme, un accroissement de 500 GWh de la productibilité moyenne du parc ne pourrait provenir d'un seul aménagement. Les nouveaux aménagements se-

	REGIONS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total Suisse
Moyenne GWh	938,0	1204,8	522,1	887,1	658,0	307,5	184,6	2846,6	208,1	7756,8
Ecart-type GWh	326,9	320,3	80,1	119,1	113,0	57,4	36,0	438,9	39,3	1274,4
Coefficient de variation %	34,8	26,6	15,3	13,4	17,2	18,7	19,5	15,4	18,9	16,4

**Tableau II Apports naturels productibles en hiver dans les différentes régions**

	REGIONS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Augmentation $\Delta$ de la variance %	10,49	11,89	6,57	7,57	9,14	9,77	9,82	10,48	9,64	
Augmentation $\Delta'$ de la variance %	23,20	19,66	6,09	6,11	9,59	11,18	11,75	9,80	11,16	

**Tableau III Augmentation de la variance en fonction de la localisation de l'aménagement**

ront répartis dans plusieurs régions. Il reste que la méthode désagrégée permet de tenir compte des effets différenciés de chacune des régions sur l'évolution de la variance des apports productibles en hiver, étant donné la localisation régionale des nouveaux aménagements.

Ainsi, toujours à titre d'illustration, si l'on admettait que l'accroissement de 500 GWh de la productibilité moyenne était réparti entre 9 nouveaux aménagements localisés chacun dans une région différente, et si:

- la productibilité moyenne de chaque aménagement était proportionnelle à la part régionale dans la productibilité moyenne du parc initial, et
- le coefficient de variation de chaque aménagement était le même que celui du parc initial de la région,

alors, l'augmentation de la variance des apports naturels productibles par le parc en hiver serait de 12% environ (11,85%).

## 5. Fonction de distribution de probabilité des apports naturels productibles en hiver

Etant donné que l'agrégation des productibilités des différents aménagements du parc donne une série hétérogène, il n'est pas possible de déterminer une fonction de distribution de type «fréquentiste». Il reste donc à modéliser les apports par une fonction de distribution théorique.

En l'absence de toute autre information que les deux premiers moments de la distribution, le principe de maximisation de l'incertitude conduirait à choisir la loi normale.

En se limitant aux aménagements dont les données couvrent au moins 20 ans, on a vérifié, par le test de Kolmogorov Smirnov que pour ces données, la loi normale convient bien.

De plus, on obtiendrait une meilleure modélisation de ces apports si l'on tenait compte de leurs limites de variation.

L'analyse des données disponibles montre que les apports naturels productibles en hiver peuvent varier de -35% à +30% autour de la moyenne.

On a donc choisi, pour modéliser la variabilité interannuelle des apports naturels productibles en hiver, une loi de la famille gaussienne mais doublement tronquée (voir [2]).

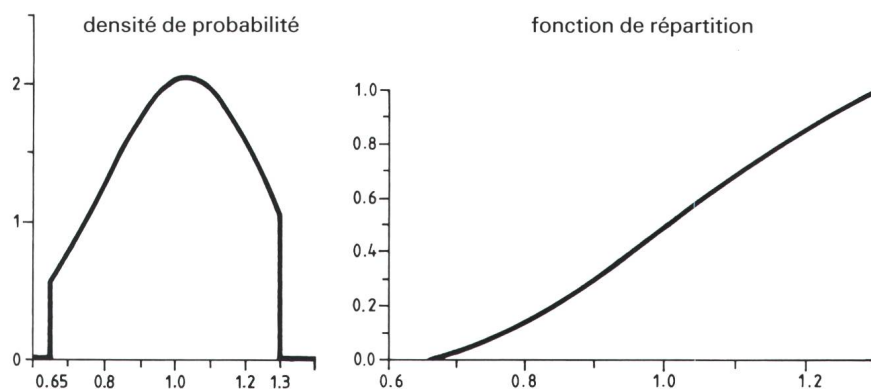


Figure 2 Fonctions de probabilité des indices des rapports productibles en hiver par le parc actuel

La figure II représente une telle loi déterminée pour les indices des apports naturels productibles en hiver par l'ensemble des aménagements du parc actuel.

A titre d'illustration, compte tenu de l'hypothèse faite pour le domaine de variations des apports naturels productibles en hiver par le parc actuel, on trouve que ces derniers atteignent ou dépassent 5570 GWh avec une probabilité de 95%. Ceci correspond à une productibilité totale en hiver égale à 11 622 GWh si l'on admet que le prélèvement en hiver sur la réserve saisonnière est égal à 73% de la capacité des réservoirs d'accumulation.

## 6. Conclusion

L'hydro-électricité constitue la principale cause de la variabilité de l'offre de l'énergie électrique en Suisse. L'énergie hydro-électrique productible en hiver dépend:

- du contenu des réservoirs d'accumulation au début de l'hiver
- et des apports naturels productibles en hiver.

En ce qui concerne le contenu des réservoirs, l'approche normative généralement utilisée consiste à le fixer à 93% de la capacité des réservoirs.

Dans la réalité, pendant les 16 dernières années, le taux de remplissage des réservoirs au début de l'hiver a été inférieur à 93% deux fois (en 1976/77 = 82,1% et en 1989/90 = 83,5%) alors qu'il a atteint une valeur maximale de 98,4% au début de l'hiver 1975/76.

Dans ce travail, on s'est limité à la modélisation des apports naturels productibles en hiver et on a proposé de nouvelles méthodes permettant de mieux évaluer leur variabilité. L'originalité de ces méthodes réside en la prise en compte:

- des variances des apports productibles en hiver par les différents aménagements du parc initial et
- des corrélations entre les apports productibles par ces aménagements.

Quant aux nouveaux aménagements, les méthodes proposées prennent aussi en considération les moyennes et les écarts-types de leurs apports alors que les corrélations sont estimées en utilisant des corrélations régionales et inter-régionales.

## Références

- [1] *Edgard Gnansounou*: Variabilité de l'énergie hydro-électrique productible en hiver. Analyse des données régionales de la Suisse. Projet du FNSRS no 2000-5.026. Septembre 1989/LASEN No 401.102
- [2] *Edgard Gnansounou*: Modélisation de la loi d'une variable aléatoire par une fonction de la famille gaussienne mais doublement tronquée: Application aux productibilités du parc hydro-électrique de la Suisse. Avril 1990/LASEN no 401
- [3] *Edgar Amthauer*: Energiemodelle für die Kraftwerksausplanung und die Betriebsführung von hydrothermischen Versorgungssystemen. Diss. ETH Nr. 6951, Zürich, 1982
- [4] *Commission fédérale de la conception globale de l'énergie*: La conception suisse de l'énergie. Rapport final, volume I, Berne, novembre 1978
- [5] *Union des Centrales Suisses d'Electricité*: Perspectives d'approvisionnement de la Suisse en électricité, 1979-1990. Sixième «Rapport des Dix», juin 1979
- [6] *Union des Centrales Suisses d'Electricité*: Perspectives d'approvisionnement de la Suisse en électricité jusqu'en 2005. Septième «Rapport des Dix», rapport complet, septembre 1987
- [7] *Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke*: Vorschau auf die Elektrizitätsversorgung der Schweiz bis 2005. Siebenter Zehn-Werke-Bericht. Arbeitsbericht: Entwicklung der Elektrizitäts-Erzeugung und Beschaffung der Schweiz bis 2004/5, Juli 1987
- [8] *Groupe d'Experts Scénarios Energétiques*: Scénarios énergétiques: Préalables, possibilités et conséquences d'un abandon de l'énergie nucléaire par la Suisse. Rapport principal, Berne, mai 1988