

# L'auscultation des barrages en Norvège : l'exemple du barrage d'Alta

## *Dam monitoring in Norway: the Alta dam example*

Clément Perchat

Statkraft France SAS, Cité Internationale de Lyon, 66 quai Charles de Gaulle, 69463 Lyon Cedex 06

[clement.perchat@statkraft.com](mailto:clement.perchat@statkraft.com)

### **MOTS CLÉS**

Norvège, NVE, barrage d'Alta, dispositif d'auscultation, Statkraft

### **RÉSUMÉ**

*L'auscultation des barrages en Norvège : l'exemple du barrage d'Alta*

*Le dispositif norvégien de surveillance des barrages a vu le jour il y a plus d'un siècle. La NVE, Direction Nationale Norvégienne des Ressources en Eau et de l'Energie, est l'autorité responsable du contrôle de ces ouvrages. Le barrage d'Alta, dont la construction s'est achevée en 1987, constitue avec ses 145 m de hauteur le plus haut barrage voûte de Norvège. Situé au Nord de la Norvège, il est soumis à d'importantes contraintes météorologiques qui ont influencé sa conception mais également les systèmes d'auscultation dont il est équipé. Afin d'assurer un suivi rigoureux de l'ouvrage, celui-ci comporte les appareillages suivants : capteurs de pression interstitielle, extensomètres, pendules, dispositifs de mesure des débits de fuite et de drainage, stations sismologiques et repères en galerie et sur parement. L'automatisation des mesures et la télétransmission des données permettent une surveillance continue de l'ouvrage. Cet équipement complète le dispositif manuel classique mais ne le remplace pas. L'analyse des mesures tout au long de la vie de l'ouvrage indique une nette diminution des débits de fuite. L'observation des déformations cycliques du barrage montre l'influence évidente de la température et du niveau d'eau dans le réservoir. Après plusieurs années, les valeurs mesurées sont conformes aux valeurs théoriques prévues.*

### **ABSTRACT**

*The practice of public supervision with dams in Norway started for more than a century. The Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) is the authority in charge of dam safety regulations. The Alta dam, whose construction period ended in 1987, is the highest arch dam in Norway (height is 145m). Located in Northern Norway, the dam is subject to severe climatic constraints which influenced its design and its monitoring system. To ensure a stringent monitoring, the following instruments were implemented: pore pressure indicators, extensometers, pendulums, reference bolts, leakage stations and seismic systems. Measurement automation and data transmission enable a constant monitoring of the dam. This does not replace manual readings. The monitoring results showed a declining trend in total seepage. The deformations are clearly influenced by temperature and water level in the reservoir. After several years, the measured parameters remain coherent with the calculated theoretical values.*

## **1. INTRODUCTION**

Traditionnellement, l'installation d'un dispositif d'auscultation sur les barrages norvégiens était destinée à surveiller de manière approfondie le comportement des ouvrages durant la mise en eau initiale et les premières années d'exploitation. La surveillance des barrages sur le long terme n'était pas systématique et se limitait à des inspections ponctuelles.

La nécessité d'un suivi à long terme du comportement et de la santé des barrages s'est imposée en 1994 lorsque l'autorité norvégienne responsable de la sûreté des installations hydrauliques a publié un ensemble de préconisations relatives à l'inspection et à l'examen de ces ouvrages. Parmi les nouveaux concepts introduits à l'époque, l'obligation tous les 15 ans d'un réexamen complet a été instaurée. Cette exigence, qui s'apparente à l'Examen Technique Complet et à la Revue de Sûreté, instaure notamment une évaluation à long terme du barrage avec comparaison du comportement observé et théorique. En parallèle, l'autorité norvégienne a publié la même année un document relatif aux plans d'urgence et à la réduction des conséquences potentielles d'une grave anomalie.

La mise en place d'un dispositif de suivi des barrages s'inscrit pleinement dans cette démarche et a abouti, en 1996, à l'établissement de recommandations concernant spécifiquement les instruments d'auscultation et de surveillance. Le présent article décrit les principales préconisations formulées dans ce document et illustre son application à travers l'exemple du barrage d'Alta.

## **2. LA REGLEMENTATION NORVEGIENNE EN MATIERE D'AUSCULTATION DES BARRAGES**

### **2.1 L'autorité responsable de la sûreté des barrages**

Le dispositif norvégien de surveillance des barrages a vu le jour en 1909. L'autorité responsable des aspects liés à la sûreté des installations hydrauliques est la NVE, Direction Nationale Norvégienne des Ressources en Eau et de l'Energie. Cette administration, qui dépend directement du Ministère du Pétrole et de l'Energie, est également chargée de l'approbation des projets de construction ou de réhabilitation. La NVE participe en outre à l'élaboration de la réglementation relative à la sûreté des barrages et établit des guides techniques dont le but est d'apporter un ensemble de recommandations dont la mise en œuvre permet aux exploitants de respecter les exigences réglementaires. L'un de ces guides techniques concerne les dispositifs de surveillance et d'auscultation des barrages (« Guidelines for monitoring and instrumentation of dams », NVE, 2005).

### **2.2 La classification des barrages**

En Norvège, la classification d'un ouvrage hydraulique (barrage, digue ...) dépend des conséquences humaines, environnementales et économiques que pourraient causer une rupture de l'ouvrage. Les ouvrages dont les impacts en cas de rupture sont jugés négligeables appartiennent à la classe 0. Ceux dont les impacts seraient les plus importants appartiennent à la classe 4. On considère qu'à partir de 150 habitations potentiellement affectées, le barrage est classé dans la catégorie la plus contraignante. Cette classification influence notamment les dispositifs à mettre en œuvre pour assurer le contrôle et la surveillance des barrages, la complexité des inspections, les qualifications du personnel responsable de la sûreté ou encore les procédures d'urgence.

### **2.3 Le plan de surveillance**

Pour chaque barrage, un plan de surveillance doit être établi. Ce document doit comporter les éléments suivants :

- un aperçu de l'ensemble du dispositif de surveillance du barrage,
- une description de l'ensemble des mesures effectuées et de leur fréquence,
- une justification du choix des différents appareillages installés ou de leur absence,
- un descriptif précisant la localisation de chacun des instruments,
- les caractéristiques techniques des instruments d'auscultation,
- une description du degré de précision des mesures,
- un programme pour l'étalonnage des instruments qui le nécessitent,
- un programme pour l'essai, l'inspection et la maintenance des instruments d'auscultation,
- une liste de paramètres surveillés en continu avec des valeurs seuils permettant le déclenchement d'actions correctives voire de mesures d'urgence.

### **2.4 Les dispositifs d'auscultation**

Le type, le nombre et la localisation des dispositifs d'auscultation dépendent de la classification du barrage mais également de ses caractéristiques telles que le type de barrage, sa hauteur, sa longueur, la qualité de ses fondations, la capacité du réservoir ou la hauteur de marnage.

Les instruments doivent, dans la mesure du possible, être simples dans leur concept et leur exploitation et permettre une lecture facile des mesures. Leur robustesse, leur résistance, leur longévité, leur précision et leur fiabilité sont autant de critères prépondérants. Les conditions climatiques en Norvège pouvant être particulièrement rudes, la résistance aux agressions externes est essentielle.

Le tableau 1, extrait du Guide Technique édité par l'administration norvégienne, fournit des indications concernant l'instrumentation et la fréquence des mesures préconisées.

TYPE DE BARRAGE		Classe	Débits de fuite	Pressions interstitielles	Déformations	Tassement	Niveaux d'eau
Barrages en remblai	Barrages en remblai avec noyau bitumineux/morainique	≥3	A		D	C	A
		2	B		D	C	B
	Barrages en remblai avec noyau en béton, en palplanches, ou matériau similaire	≥3	B		D		A
		2	B		D		B
	Barrages en remblai avec fondations sur terrain ou rocher présentant des zones de faiblesse	≥3	A	B	D	C	A
		2	B	B	D	C	B
Barrages en béton ou en maçonnerie	Barrages à contreforts, à voûtes multiples ou en maçonnerie	≥3	C		D		A
		2	C				C
	Barrages voûtes	≥3	C		C		A
		2	C				C
	Barrages en béton ou en maçonnerie sur terrain ou rocher présentant des zones de faiblesse	≥3	A	B	D		A
		2	B	B			B



- A** Mesures et relevés en continu.
- B** Mesures en continu. Les relevés sont effectués au moins une fois par an.
- C** Mesures et relevés effectués au moins une fois par an, en général lors des inspections périodiques.
- D** Mesures et relevés effectués durant les inspections principales (tous les 5 ans).

Le terme 'mesures' implique un enregistrement et un archivage des données.

**Tableau 1 : Dispositifs d'auscultation préconisés par l'administration norvégienne selon le type de barrage**

Les dispositifs complémentaires suivants peuvent être pertinents :

- Mesure des déformations et des fissures dans les environs du barrage : Il peut être important de surveiller les mouvements au niveau des versants de la vallée où se situe la retenue, ou de mesurer les altérations dans certaines formations rocheuses susceptibles de menacer le barrage ou la retenue en cas de glissement de terrain.
- Photographies aériennes : Les photos aériennes peuvent être utiles pour surveiller le mouvement de zones instables autour de la retenue.
- Surveillance par caméra : Dans le cas où des observations doivent être régulièrement effectuées, par exemple pour surveiller des vannes commandées à distance, l'installation de caméras de surveillance est recommandée.
- Mesure de la turbidité : Il peut être intéressant d'installer un dispositif de mesure de la turbidité dans le cas où une érosion interne des fondations ou du corps du barrage a été repérée.
- Relevés topographiques des barrages en enrochement : Un relevé topographique effectué à l'aide d'un sonar par exemple peut être utile pour suivre les déformations difficiles à détecter telles que celles résultant de l'action de vagues sur le parement amont.

## 2.5 Précision des mesures

Pour s'assurer de la fiabilité des mesures, des procédures d'étalonnage doivent être établies. La redondance du système d'auscultation est également importante : il s'agit de mettre en œuvre différentes méthodes permettant de vérifier par des moyens indépendants les mesures. Le tableau 2 fournit à titre indicatif le degré de précision des différents dispositifs d'auscultation auquel on peut s'attendre.

Paramètre	Unité	Précision	Commentaires
Niveau d'eau	m.a.s.l.	+/-0.01m 0.1% pour une plage de mesure >10m	Plage de mesure : à partir du niveau de crue de projet jusqu'au niveau des plus basses eaux
Fuites	L/s	+/- 10%	Plage de mesure : 1-500 L/s
Pression interstitielle	m.a.s.l	+/- 0.5m	Plage de mesure : niveau du capteur jusqu'au niveau de la crue de projet
Tassement	mm	+/- 1mm	Mesure par nivellement
Déformation (barrages en enrochements)	mm	+/- 5 mm	
Déformation (barrages en béton)	mm	+/- 2mm	
Température du béton ou de l'air	°C	+/- 1°C	

*Tableau 2 : Degré de précision des dispositifs d'auscultation admis par l'administration norvégienne*

## 2.6 Présentation et interprétation des mesures

L'analyse et l'interprétation des mesures doivent toujours se faire en prenant en compte la précision des instruments utilisés et les autres paramètres pouvant exercer une influence. Il est primordial de repérer toute déviation ou changement brusque dans les mesures.

Il est conseillé de représenter les mesures d'auscultation sous forme de graphiques sur lesquels on fera apparaître toute particularité (changement brusque ou dérive à long-terme).

Pour chaque mesure, des valeurs limites doivent être établies afin de faciliter l'interprétation puis la mise en place d'actions correctives.

## 3. L'EXEMPLE DU BARRAGE D'ALTA

### 3.1 Présentation générale du barrage d'Alta

Le barrage d'Alta, dont la mise en eau remonte à 1987, constitue avec ses 145 m de hauteur le plus haut barrage voûte de Norvège. Il a permis la création d'un réservoir d'eau de 140 hm<sup>3</sup>, représentant seulement 6% des apports annuels entrants. Situé au-delà du cercle polaire, 1400 km au nord d'Oslo, il est soumis à d'importantes contraintes climatiques qui ont influencé sa conception mais également les systèmes d'auscultation dont il est équipé. Dans cette région septentrionale, l'amplitude thermique entre l'été et l'hiver peut atteindre les 70°C.

Les principales caractéristiques du barrage sont les suivantes :

- **Propriétaire** : Statkraft
- **Type** : Barrage voûte à double courbure
- **Période de construction** : 1984 - 1987
- **Hauteur** : 145 m
- **Longueur** : 150 m
- **Niveau de plus hautes eaux** : 265 m
- **Niveau des plus basses eaux** : 200 m
- **Volume du réservoir** : 140 millions de m<sup>3</sup>
- **Classe** : 4 (importants enjeux à l'aval : ville d'Alta de 18000 habitants)
- **Capacité installée dans la centrale d'Alta** : 150 MW
- **Production annuelle moyenne de la centrale d'Alta** : 625 GWh

La rivière Alta, sur laquelle est implanté le barrage, présente de forts enjeux environnementaux liés à son potentiel salmonicole. Cet aspect implique certaines contraintes d'exploitation telles que la présence de deux prises d'eau à des profondeurs différentes. Cette configuration permet de réduire l'impact thermique du rejet en choisissant le niveau de prélèvement le plus favorable selon la saison.

### 3.2 Organisation de la surveillance du barrage

La surveillance optimale du barrage s'organise autour :

- des inspections visuelles,
- des mesures des paramètres issus des dispositifs d'auscultation,
- des essais de fonctionnement des vannes, de l'instrumentation et des moyens de communication.

La surveillance du barrage d'Alta s'effectue selon 4 niveaux :

- **1er niveau** : le personnel exploitant la centrale d'Alta effectue périodiquement des contrôles visuels, des mesures avec un premier contrôle des valeurs brutes, ainsi que des essais de fonctionnement.
- **2ème niveau** : le responsable inspection de l'exploitant, référent auscultation au sein de la Direction Régionale à laquelle appartient la centrale d'Alta, effectue deux fois par an des inspections avec contrôles visuels approfondis. Les défaillances repérées sont priorisées et consignées dans des rapports d'inspection. Ces visites s'apparentent à la VTA de la réglementation française.
- **3ème niveau** : l'ingénieur agréé de l'exploitant, rattaché à la Direction Régionale à laquelle appartient la centrale d'Alta, reçoit les mesures d'auscultation et les rapports d'inspection. Il est chargé tous les 5 ans de mener une « inspection principale » et tous les 15 ans un « réexamen complet » de l'ouvrage.
- **4ème niveau** : l'autorité de surveillance (NVE) est la destinataire des rapports rédigés à l'issue de l'inspection principale et du réexamen complet. Elle se déplace en outre régulièrement sur les installations.

Le tableau 3 ci-après résume la répartition des tâches des intervenants des trois premiers niveaux.

Quoi	Qui	Tâches
Contrôles visuels	1) Personnel de la centrale	Inspection régulière (hebdomadaire)
	2) Personnel d'inspection	Inspection périodique (semestrielle à niveau haut et niveau bas) avec élaboration d'un rapport de visite
	3) Ingénieur agréé	Inspection de l'ouvrage tous les 2 ans Inspection principale tous les 5 ans Réexamen complet tous les 15 ans
Mesures	1) Personnel de la centrale	Exécution des mesures (mensuelle) Contrôle préliminaire des valeurs brutes
	3) Ingénieur agréé	Analyse des résultats des mesures Analyse comportementale du barrage
Contrôles et essais périodiques de fonctionnement	1) Personnel de la centrale	Manœuvre des vannes (mensuelle pour les plus stratégiques)
	2) Personnel d'inspection	Contrôle du fonctionnement des appareils d'auscultation (semestriel) Contrôle visuel et structurel des vannes (semestriel)

*Tableau 3 : Répartition des tâches relatives à l'auscultation du barrage*

### 3.3 Dispositif d'auscultation

Afin d'assurer un suivi précis et rigoureux de l'ouvrage, celui-ci est équipé des dispositifs d'auscultation suivants :

- 41 capteurs de pression interstitielle
- 14 extensomètres de forage multipoints (3 points d'ancrage)
- 45 repères pour distomètres (dans les galeries)
- 20 repères sur le parement aval
- 3 pendules dont 2 directs et 1 inversé
- 6 dispositifs de mesure des débits de fuite et de drainage
- 2 stations sismologiques (accélérographes)

Près de la moitié des capteurs de pression sont équipés de cellules à cordes vibrantes. Pour chacun des extensomètres, les points d'ancrages situés à la plus grande profondeur disposent également d'un capteur à cordes vibrantes. Les extrémités des 3 pendules sont équipées de capteurs de déplacement selon deux directions orthogonales. La mesure des débits est effectuée par l'intermédiaire de déversoirs calibrés de forme triangulaire. Parmi les 6 dispositifs de mesure des débits, 4 disposent d'une sonde de pression hydrostatique.

Par ailleurs, la température de l'eau du réservoir est mesurée à l'aide de deux capteurs situés au niveau de chacune des prises d'eau. Le niveau d'eau de la retenue est mesuré par l'intermédiaire d'une balance à pression disposant de deux sondes. Un dispositif avec flotteur assure la redondance de la mesure.

Le dispositif d'auscultation du barrage n'est pas un système figé : la phase de première mise en eau nécessite un suivi de l'ouvrage plus précis qu'en exploitation courante. Après 25 années d'exploitation, les principaux paramètres mesurés en continu et télétransmis sont : le niveau du plan d'eau, les débits de fuite et de drainage, les mesures issues des pendules ainsi que les alarmes provenant des accélérographes.

Tous les mois, le personnel de la centrale relève manuellement et analyse la cohérence des paramètres suivants : le niveau du plan d'eau, les déformations (extensomètres et pendules), les pressions interstitielles ainsi que les débits de fuite et de drainage.

A titre d'illustration, les Figures 1, 2 et 3 présentent la disposition des appareils d'auscultation du barrage d'Alta.

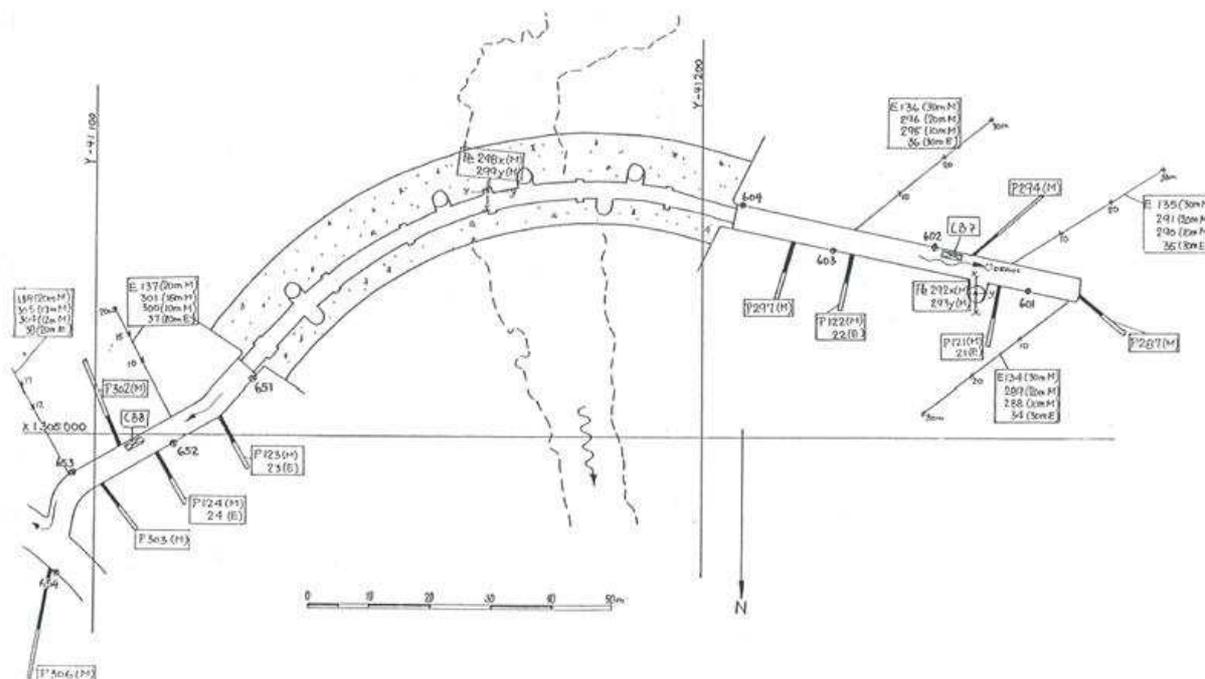


Figure 1 : Schéma d'implantation des dispositifs d'auscultation du barrage d'Alta (cote 236m)

Légende :

P : capteur de pression interstitielle	Pe : pendule	(M) : mesure manuelle
E : extensomètre de forage	o : repère pour distomètre	(E) : mesure automatique

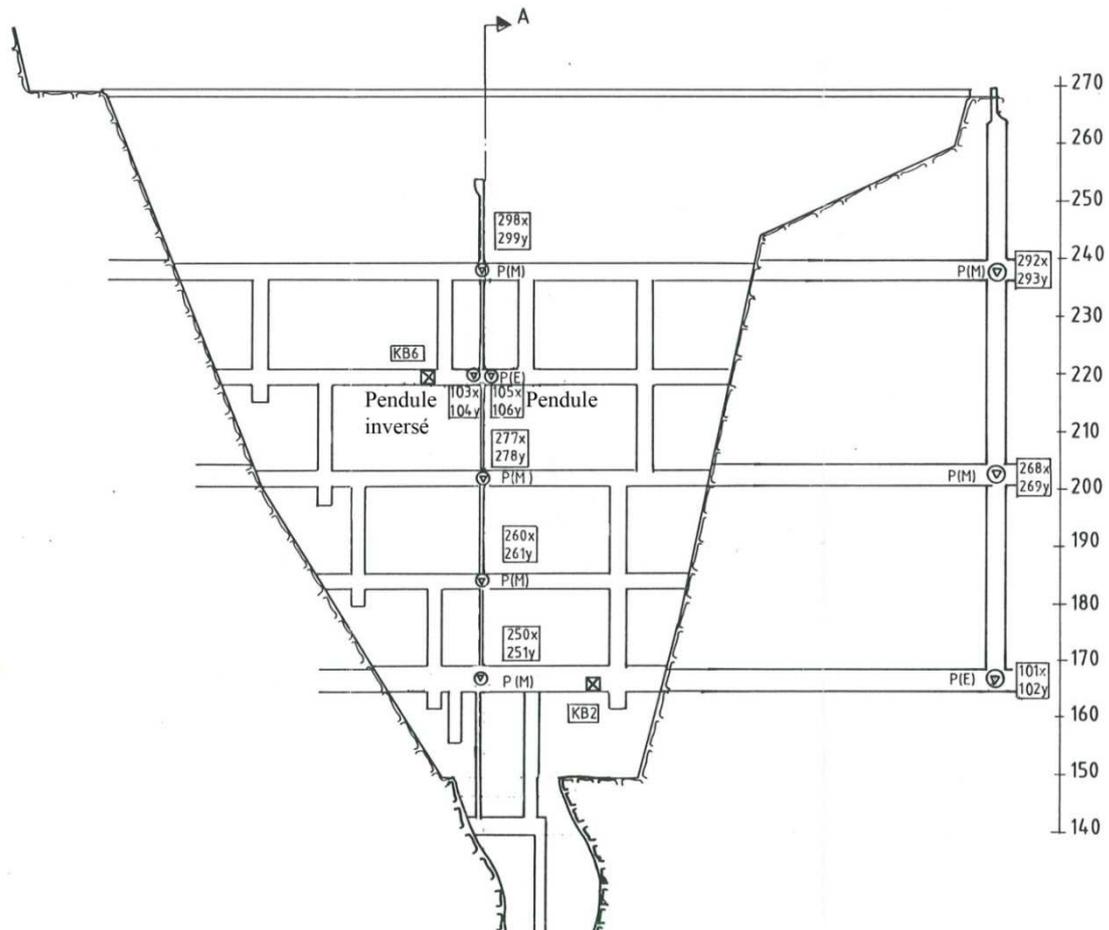


Figure 2 : Barrage d'Alta : schéma d'implantation des pendules

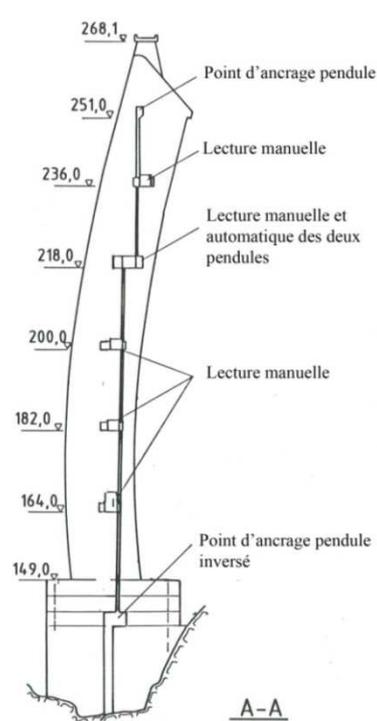


Figure 3 : Barrage d'Alta : schéma d'implantation des pendules (coupe A-A)

### 3.4 Analyse des données d'auscultation

La figure 4 présente, pour toute la durée de vie de l'ouvrage, l'évolution du niveau d'eau dans la retenue, des déformations et du débit total des fuites et drainages.

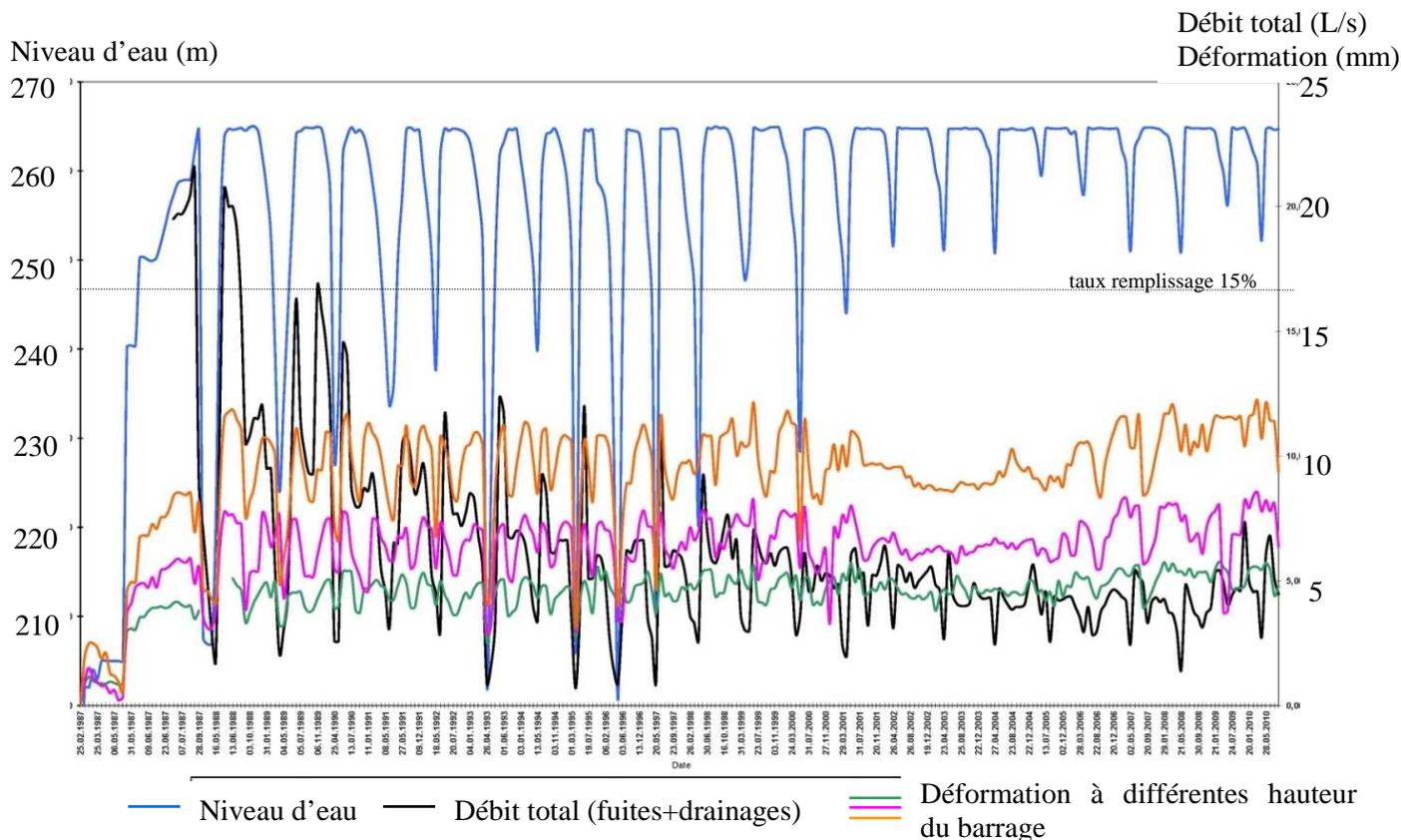


Figure 4 : Evolution des paramètres d'auscultation du barrage d'Alta de 1987 à 2011

#### 3.4.1 Suivi des déformations

Le niveau d'eau dans le réservoir exerce une influence évidente sur les déformations subies par le barrage. Les mouvements observés les plus importants se produisent durant la période des crues survenant au printemps. La retenue, qui est habituellement abaissée à son minimum avant la venue des crues, voit alors son niveau augmenter rapidement, passant de 200 à 265 m en quelques semaines. La déformation radiale durant cette période dépasse les 10 mm à la cote 318 m.

La déformation due à la pression hydrostatique est toutefois atténuée durant l'été et l'automne par les températures de l'eau et de l'air plus élevées. Le refroidissement du corps du barrage durant la période hivernale exerce l'effet opposé, renforçant les effets de la pression de l'eau et amplifiant donc les déformations radiales.

#### 3.4.2 Suivi des débits de fuite et de drainage

Le niveau d'eau dans le réservoir exerce une influence sur les débits de fuite et de drainage. Les débits les plus importants sont mesurés chaque année lorsque la retenue est pleine, juste après les crues de printemps.

On observe toutefois une nette tendance à la diminution depuis la première mise en eau. Le débit maximum mesuré durant les premières années pendant la période des plus hautes eaux avoisinait les 20 L/s. Il est d'environ 5 L/s aujourd'hui.

Cette baisse significative s'explique par un colmatage des fissures dans la roche dû à la présence de particules et de sédiments dans les eaux de la rivière Alta.

#### 4. CONCLUSION

Mis en eau en 1987, le barrage d'Alta bénéficie des récents progrès techniques et scientifiques réalisés dans la conception des barrages et plus particulièrement dans le domaine de l'auscultation.

Le suivi et l'analyse des déformations depuis la date de première mise en eau n'ont fait apparaître aucune différence significative entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques prévues.

Les mesures issues du dispositif d'auscultation du barrage d'Alta indiquent un comportement tout à fait satisfaisant pour un ouvrage de cette taille soumis à des amplitudes de température relativement importantes.

##### STATKRAFT

*Concepteur, bâtisseur et exploitant hydroélectrique depuis plus de 100 ans et spécialiste de la gestion d'aménagements hydroélectriques complexes, Statkraft gère 350 barrages dans le monde, dont 25 % d'une hauteur supérieure à 20 m. Pour l'année 2011, le groupe a produit 46TWh d'électricité d'origine hydraulique.*

*27 projets visant à augmenter le potentiel énergétique des installations existantes sont actuellement développés en Norvège, pour un gain de capacité attendu de 700MW.*

*Des projets d'équipements en pompage sur des réserves existantes en Norvège sont également en cours de déploiement et permettront d'améliorer la flexibilité du parc.*

*A moyen terme, et dans le cadre de projets internationaux encore à développer, Statkraft pourrait contribuer à fournir une réserve d'énergie aux systèmes de production européens utilisant de plus en plus de moyens de production intermittente.*

#### RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Norwegian Water Resources and Energy Directorate (2004). *Guidelines for monitoring and instrumentation of dams*. NVE, Oslo, Internet : [www.nve.no](http://www.nve.no)
- [2] Konow, T. (2004). *Monitoring of dams in operation – a tool for emergencies and for evaluation of long-term safety*. Canterbury. 13<sup>th</sup> conference of the British Dam Society: Long-term benefits and performance of dams.
- [3] Schleiss, A. & Pougatsch, H. (2011). *Les Barrages : du projet à la mise en service*. Traité de Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [4] Tronstad, K., Johansen, P.M., Engene, B. & Myrset, O. (1990). *Instrumentation and monitoring of the Virdejavri Arch Dam - Alta*. Institution of Civil Engineers.
- [5] Møller, I. (2008?). *Norske Dammer bind 2*. Energi Forlag AS.