

La surveillance des ouvrages à EDF

■ Rémy BOUDON - Michel TROUILLET

Au sein d'EDF, l'unité d'ingénierie DTG (Division Technique Générale), est chargée d'assister les unités d'exploitation hydrauliques, nucléaires et thermiques pour la performance et la surveillance des ouvrages. Cette unité est composée d'une vingtaine de services intervenant aux différentes phases de vie des ouvrages : projet, construction, mise en service, suivi, déconstruction. C'est dans le Service Ingénierie Topographie ainsi que dans deux Centres Régionaux d'Auscultation de cette unité que sont basés les géomètres topographes qui assurent, entre autres, les mesures d'auscultation topographique sur les ouvrages.

Cet article présente les principes de la surveillance des ouvrages en vigueur à EDF et l'organisation en place. Il détaille ensuite les multiples techniques topographiques déployées sur les différents types d'ouvrage.

■ **MOTS-CLÉS**

Surveillance, auscultation topographique, ouvrages hydro-électriques, centrales nucléaires



Figure 1. Barrage

- des ouvrages divers comme des digues de canaux, des galeries souterraines d'amenée d'eau, des conduites forcées, des usines enterrées...

Les glissements de terrain situés à proximité des ouvrages sont également surveillés.

Le parc d'ouvrages nucléaires comprend quant à lui :

- 58 réacteurs nucléaires répartis sur 19 sites,
- les bâtiments des îlots nucléaires, les salles des machines, les stations de pompage, les galeries et conduites enterrées,
- 33 tours dites aéroréfrigérantes.

La surveillance

On peut définir la surveillance comme l'ensemble des actions qui peuvent être mises en œuvre pour apprécier à tout moment l'état d'un ouvrage. La surveillance couvre toutes les actions de détection précoce d'anomalies et la mise en évidence d'évolutions lentes, essentielles pour la sûreté et le diagnostic périodique de l'état d'un ouvrage.



Figure 2. Centrale nucléaire

Le parc d'ouvrages de production d'EDF

L'ensemble des ouvrages de production d'électricité d'EDF qui présentent un enjeu de sûreté ou un enjeu économique sont surveillés.

Le parc hydroélectrique se compose d'un grand nombre d'ouvrages de tout type :

- 160 barrages de classe A (hauteur supérieure à 20 m selon le décret N° 2007-1735 du 11 décembre 2007),
- 210 barrages de classes B et C (hauteur supérieure à 10 m pour la classe B, 5 m pour la classe C et selon le volume d'eau retenu),



Figure 3. Lecture d'une table de pendule

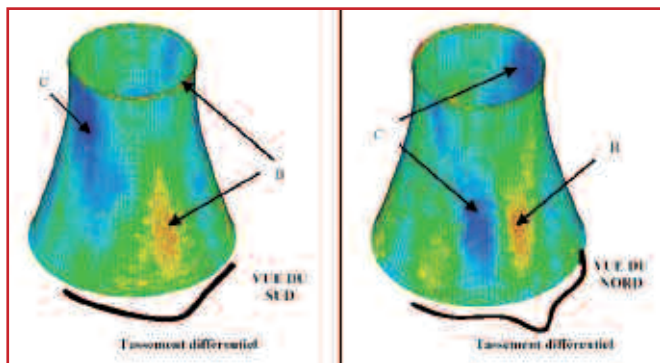


Figure 4. Analyse des déformations de la coque d'un aéroréfrigérant

Les enseignements du passé ont fondé la culture sûreté dans le monde des ouvrages de production d'énergie et notamment les quelque 150 ruptures de barrages depuis le XIX^e siècle, dont les plus marquantes sont :

- le glissement de terrain dans la retenue du VAJONT en Italie en 1963,
- l'érosion interne (renard hydraulique) ayant entraîné la rupture du barrage en terre de TETON aux USA en 1976,
- et la rupture du barrage de MALPASSET en France en 1979.

Ce sont aussi les effondrements de tours aéroréfrigérantes comme celle de la centrale thermique au charbon de BOUCHAIN en France en 1979.

Les statistiques sur les ruptures de barrages font apparaître que :

- 50% des ruptures interviennent lors de la construction ou lors de la première mise en eau,
- 30% des ruptures interviennent en exploitation, liées à des phénomènes naturels exceptionnels tels que des crues ou des séismes,
- et près de 20% sont liées à des défauts de surveillance ou d'entretien.

Le principal enseignement du passé est que les sinistres préviennent le plus souvent via des signes avant-coureurs qu'il est possible de déceler. La surveillance durant l'exploitation des ouvrages est donc fondamentale pour assurer la sûreté des installations à court et à long termes.

La surveillance est aujourd'hui une exigence réglementaire (décret N° 2007-1735 du 11 décembre 2007 pour les



Figure 5. Auscultation topographique d'un barrage

barrages) ou contractuelle. Elle doit permettre de vérifier le respect des hypothèses de construction des ouvrages, la définition de seuils d'alerte et le suivi du vieillissement. C'est aussi une aide à la décision et à l'optimisation des opérations de maintenance à effectuer sur les ouvrages.

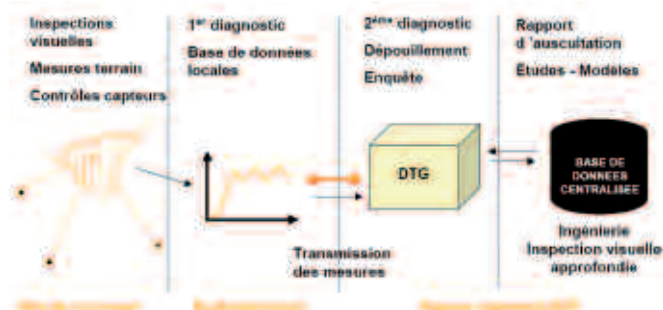
Parmi les signes d'évolution des ouvrages qu'il faut pouvoir détecter, certains sont mesurables, d'autres sont observables : la surveillance comporte donc deux volets :

- un volet observation : l'**inspection visuelle**, base de la surveillance, assistée aujourd'hui par des outils performants,
- un volet mesure : l'**auscultation**, à partir d'une instrumentation permanente en exploitation ou mise en place lors d'essais périodiques pour évaluer la réaction de l'ouvrage à une sollicitation donnée.

L'instrumentation est au service du diagnostic de comportement. Elle est adaptée au type d'ouvrage et aux phénomènes physiques à surveiller : piézométrie, débit, déplacement, force, contrainte... Les capteurs associés sont choisis en fonction de leurs caractéristiques techniques et de leur pérennité. Les techniques topographiques font partie intégrante de ces instrumentations en tant que "capteur" de déplacement, absolu ou relatif.

Organisation de la surveillance à EDF

L'organisation de la surveillance à EDF est résumée dans le schéma ci-dessous.



Sur le site de l'ouvrage, des tournées périodiques de surveillance sont réalisées par les agents locaux d'exploitation. Lors de ces tournées, ces agents mesurent l'ensemble des capteurs *insitu* constituant le dispositif d'auscultation (piézomètres, débits de fuites, pendules, fissuromètres, extensomètres...) et procèdent à des inspections visuelles. Ils enregistrent ces mesures dans la base de données et font des diagnostics de premier niveau en visualisant les mesures par rapport à leurs historiques et en les comparant le cas échéant à des seuils d'alerte pré-définis.

Un diagnostic de deuxième niveau est ensuite réalisé par DTG en temps réel. Les mesures sont alors corrigées des phénomènes influents grâce aux modèles statistiques élaborés à partir des historiques de mesures ce qui permet une vérification plus fine du comportement normal des ouvrages.

Les mesures plus spécialisées comme les auscultations topographiques ou les inspections visuelles approfondies sont



réalisées par des services spécialisés des unités d'ingénierie. Enfin, DTG rédige les rapports d'auscultation couvrant les 2, 5 ou 10 dernières années de mesure (lors des visites décennales). Ces rapports sont transmis à l'autorité de contrôle la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement).

Les outils, les méthodes

La surveillance s'appuie sur une doctrine technique élaborée au cours du temps et basée sur l'expérience. Cette doctrine définit les phénomènes physiques à mesurer, l'instrumentation à mettre en place et la fréquence des mesures à réaliser. Cette expérience est capitalisée sous forme d'instructions techniques internes qui sont revues et mises à jour régulièrement.

Dans la pratique, la surveillance s'appuie sur des outils structurants et productifs : les données relevées lors des tournées de surveillance sont saisies sur des terminaux de saisie portable puis basculées automatiquement dans la base de données. Pour les barrages situés en haute montagne et d'accès difficile en hiver, l'instrumentation est télémessurée. Enfin, des logiciels de modélisation et d'analyses statistiques des données permettent d'exploiter efficacement les données enregistrées pour mettre en évidence des comportements anormaux ou des dérives lentes.

La topographie = capteur de déplacement

La topographie est largement utilisée comme moyen de capter les déplacements absolus ou relatifs sur les ouvrages. Un grand nombre de techniques topographiques sont utilisées en auscultation, on peut citer notamment :

- Le nivellement direct de précision (niveaux optique et électronique)
- La topographie classique, mesures d'angles et de distances (stations totales motorisées)
- Le système GPS en mode statique
- La photogrammétrie (classique ou numérique)
- Le scanner laser
- Le laser tracker

et, bien sûr, la combinaison de ces techniques entre elles ou précédant d'autres capteurs de façon à optimiser l'instrumentation au besoin initial.

L'auscultation topographique sur différents types d'ouvrage

Les exemples présentés dans ce paragraphe illustrent l'emploi de techniques topographiques dans l'auscultation de divers types d'ouvrage. Quelle que soit la technique employée, une redondance suffisante sur les observations sera toujours recherchée pour garantir la qualité des mesures, avant de les exploiter pour analyser le comportement de l'ouvrage.

Les autres capteurs de mesures utilisés en auscultation (pendules, extensomètres, cellules de mesure de pression,

piézomètres, débits de fuites...) ne font pas l'objet de cet article.

■ Les barrages



Figure 6. Auscultation automatisée d'un barrage

Les risques diffèrent selon les types de barrages : glissement, basculement, tassement différentiel de fondation, déformation des appuis, déformation interne...

Les mesures topographiques les plus utilisées sur les barrages pour le suivi des déplacements sont le nivellement direct et la planimétrie classique (triangulation et trilatération) automatisée ou non.

Le référentiel est matérialisé sur site par un canevas de piliers topographiques à partir desquels sont effectuées les mesures sur les repères ouvrage (cocardes ou prismes). Ce canevas est entretenu et surveillé (contrôle de stabilité) pour garantir la pérennité du référentiel de mesure sur le long terme.

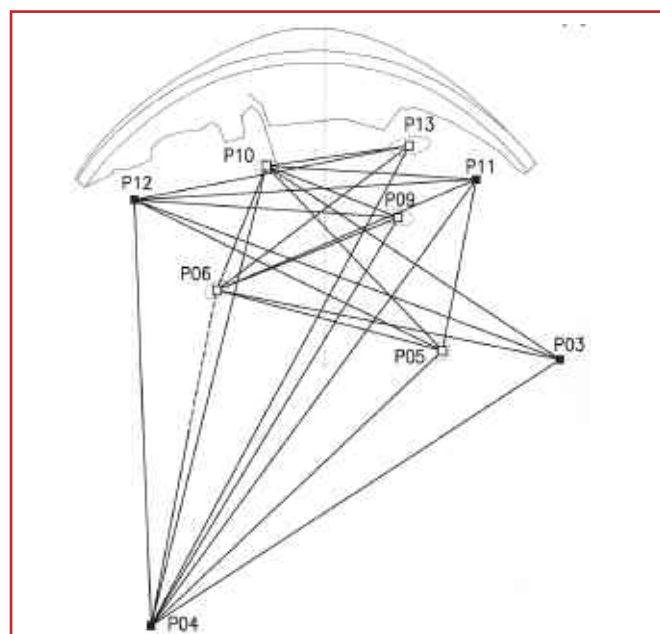


Figure 7. Canevas d'auscultation d'un barrage

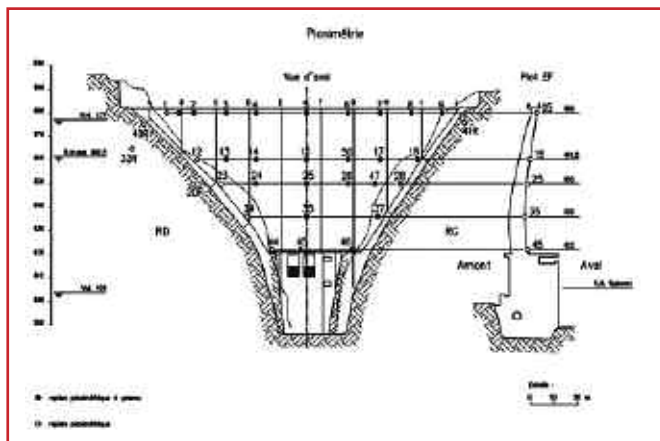


Figure 8. Dispositif d'auscultation d'un barrage

■ **Les conduites forcées**

Certaines conduites forcées sont situées sur des zones instables. Les mouvements du terrain peuvent engendrer des contraintes sur les tuyauteries pouvant entraîner leur rupture. Des systèmes de détensionnement sont prévus sur les conduites soumises à ce risque. La surveillance doit permettre de prévoir ces opérations de maintenance. Les mesures topographiques d'auscultation sont généralement réalisées sur les massifs béton d'appui et de blocage des conduites.

Il s'agit le plus souvent de mesures d'angles et distances à partir d'un canevas de piliers, ou de polygonation le long de la conduite dans les zones boisées.

Sur les conduites de grande longueur et suffisamment dégagées on emploie aussi le système GPS avec des mesures en mode statique.



Figure 9. Auscultation d'une conduite forcée

Les mesures topographiques sont parfois complétées par des mesures locales de bases de 1 m sur la conduite elle-même, effectuées à l'aide de cannes en invar de haute précision permettant d'évaluer l'évolution des contraintes dans le métal.

■ **Les galeries d'amenée**

Les galeries qui amènent l'eau des barrages vers les usines ont des longueurs de plusieurs kilomètres et traversent parfois des zones de terrains instables. Dans ces zones, le risque est la déformation du revêtement en béton de la galerie pouvant aller jusqu'à un éboulement et une obstruction.

Des auscultations locales sont effectuées par mesure de convergences sur des profils placés dans ces zones instables. Les points de mesure sont matérialisés par des chevilles inox permettant un repositionnement précis des cibles (prismes sphériques de type Baechler par exemple). Les mesures sont faites avec un tachéomètre de précision. Cette méthode permet d'obtenir les déformations relatives 3D des points du profil.

Sur certaines galeries ces mesures sont complétées par une mesure de profil en long en trois dimensions. Cette mesure s'effectue par un cheminement polygonal sur des consoles amovibles fixées sur des plaques de référence scellées au revêtement de la galerie (consoles de type Baechler par exemple).



Figure 10. Auscultation d'une galerie

En général il n'est pas possible de rattacher correctement ces mesures à l'extérieur car l'accès aux galeries se fait souvent par des trous d'homme. Les mesures sont alors faites en relatif par rapport à des points de référence en galerie situés en dehors des zones instables.

■ **Les vannes de barrage et les portes d'écluse**

Les vannes des barrages et les portes des écluses sont des ouvrages métalliques de grande dimension qui doivent pouvoir être manœuvrés à tout moment. Leur fonctionnement peut être gêné dans le cas de mouvements des ouvrages de génie civil sur lesquels elles sont ancrées. Ces mouvements sont donc surveillés, en général par nivellement direct de précision et par des mesures d'écartement



Figure 11. Vanne de barrage



Figure 12. Relevé 3D sur la porte d'une écluse

(distance-mètre ou fil invar) au niveau des vannes. Sur les ouvrages qui présentent des mouvements importants, des relevés complémentaires 3D sont effectués ponctuellement sur les pièces fixes (axes de rotation, rails, plaques d'appui...) scellées dans le béton, afin de vérifier leur géométrie relative et les cinématiques de manœuvres.

■ Les glissements de terrain

Plusieurs glissements de terrain sont situés à proximité de retenues ou d'ouvrages. Le risque principal est le glissement d'un volume très important de matériaux qui pourrait produire une vague passant par dessus le barrage ou bien créer un barrage naturel dans une vallée qui pourrait céder avec la montée de l'eau à l'amont.

Le but de l'auscultation topographique est de suivre l'évolution de la vitesse de ces glissements dans le temps.

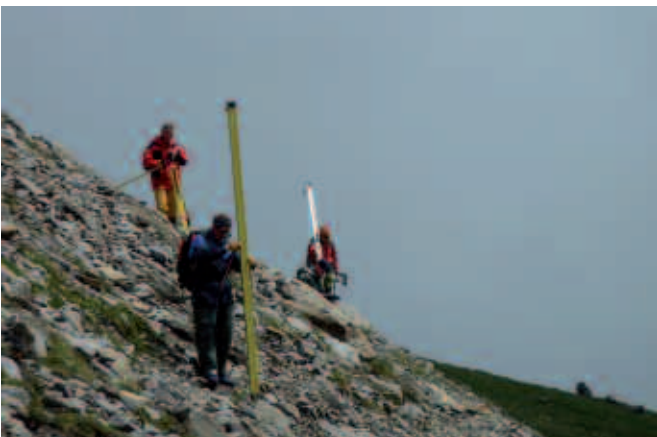


Figure 13. Auscultation altimétrique d'un glissement de terrain



Figure 14. Auscultation par GPS statique d'un glissement de terrain

Le nivellement direct de précision est souvent employé en réalisant des cheminements traversant les zones de glissement et rattachés à des zones stables aux extrémités.

Des mesures classiques par tachéomètre à partir d'un canevas situé dans une zone stable sont aussi utilisées. Sur des glissements de terrains nécessitant des mesures fréquentes, on peut être amené à équiper les points de mesures de prismes et installer un ou plusieurs tachéomètres motorisés à poste fixe (dans des casemates protégées) pilotés par un logiciel d'auscultation.

Enfin, sur des glissements de grande étendue, on emploie le système GPS en mesure statique qui permet de se rattacher à des points fixes plus éloignés qu'en mesure classique avec une précision suffisante et de s'affranchir de la contrainte de visibilité entre points.

■ Auscultation des aéroréfrigérants des centrales nucléaires et thermiques

Il s'agit d'ouvrages de grande dimension : hauteur de 120 à 180 m, diamètres au linteau de 90 à 140 m et au couronnement de 60 à 90 m, et à coque mince : l'épaisseur de ces coques est de 20 à 25 cm sur les deux tiers de la hauteur. Même s'ils ne relèvent pas directement de la sûreté nucléaire, ces ouvrages sont indispensables pour la disponibilité des centrales. Le vieillissement de ces structures atypiques doit donc être maîtrisé.

La surveillance topographique porte sur les tassements différentiels du supportage et sur la géométrie de la coque.



Figure 15. Aéroréfrigérants d'une centrale nucléaire



Comme pour la plupart des dispositifs, les fréquences de mesures sont importantes pendant la construction des bâtiments, puis sont adaptées à la vitesse d'évolution des tassements.

■ Auscultation des enceintes de confinement des réacteurs

Les enceintes de confinement des bâtiments réacteurs sont réalisées en béton précontraint. Elles ont une fonction de sûreté importante et sont surveillées par de nombreux capteurs (pendules, extensomètres...) et ne requièrent pas de mesures d'auscultation topographiques particulières, hormis le nivellement de leur radier comme pour les autres bâtiments de l'îlot nucléaire (voir le paragraphe précédent).

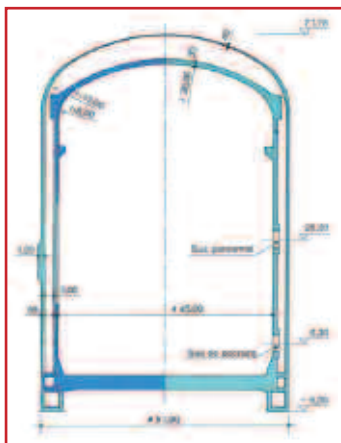


Figure 21. Schéma d'une enceinte à double paroi

Un test d'épreuve en pression est réalisé sur ces enceintes en fin de construction puis tous les 10 ans. Lors de ces épreuves, une mesure d'auscultation topographique du tampon d'accès matériel est réalisée sur certaines enceintes à double paroi.

Le tampon est un cylindre métallique à axe horizontal traversant les deux enceintes et utilisé pour les entrées et les sorties de gros matériels. Son diamètre est d'environ 8 m et sa longueur de 5 m. La mesure porte sur des points répartis selon des profils au niveau de l'enceinte interne, les points sont matérialisés par des mini-prismes et la mesure est faite avec un tachéomètre de précision motorisé.

Les mesures sont généralement effectuées à différents paliers lors du test : avant épreuve ; au palier 1 bar, au palier à pression nominale et après épreuve.



Figure 22. Auscultation d'un tampon d'accès matériel

■ Auscultation des groupes turbo-alternateurs (GTA)



Figure 23. Groupe turbo alternateur

Le groupe turbo-alternateur d'une centrale transforme la vapeur produite par le réacteur en électricité, il comprend un corps haute pression, plusieurs corps basse pression et un alternateur. Il est installé sur une table en béton armé de 50 à 60 m de longueur supportée par des poteaux d'une hauteur d'environ 15 m au-dessus du radier.

La surveillance de cette machine porte sur le "lignage" c'est-à-dire l'alignement de la ligne d'arbres des rotors haute pression, basse pression et de l'alternateur. Pour assurer la durée de vie et la disponibilité de ce matériel qui tourne à 1500 tours/mn il faut limiter ses contraintes mécaniques en assurant un lignage parfait au dixième de millimètre des rotors en fonctionnement.

Le but des mesures effectuées sur ces machines est de faire de la maintenance prédictive, c'est-à-dire de déterminer avant l'arrêt de la machine les réglages éventuels à réaliser au cours de l'arrêt programmé.

Les mesures sont effectuées par nivellement direct de haute précision sur la machine en fonctionnement à 100 % de la puissance. En raison des vibrations il est nécessaire d'utiliser un niveau de type N3.



Figure 24. Galerie technique d'une centrale nucléaire



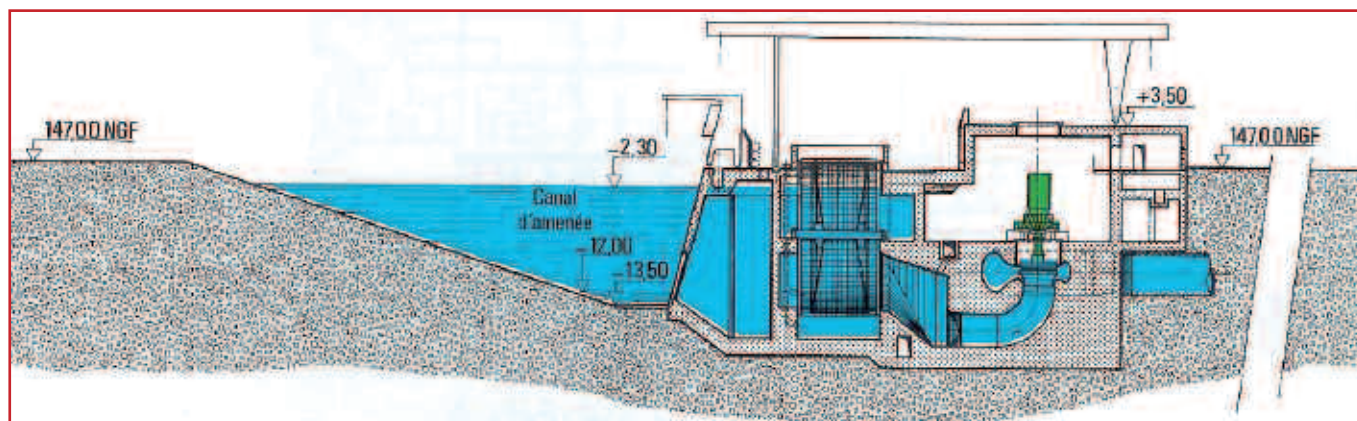


Figure 25. Station de pompage d'une centrale nucléaire

► Le calcul est effectué par compensation d'un réseau de nivellement maillé, selon la méthode des moindres carrés.

■ Auscultation des autres ouvrages des centrales nucléaires

Sur les centrales nucléaires les autres ouvrages importants pour la sûreté comme les canaux, les ouvrages de prises d'eau, les stations de pompage, les galeries ... font l'objet d'une surveillance.

Les mesures d'auscultation concernent principalement l'altimétrie de ces ouvrages : tassements absolus et tassements différentiels aux jonctions entre ouvrages. Elles sont réalisées par nivellement direct de précision.

Conclusion

Comme le montre l'exposé non exhaustif qui précède, les techniques de mesures topographiques sont largement utilisées pour répondre aux besoins d'auscultation des déplacements

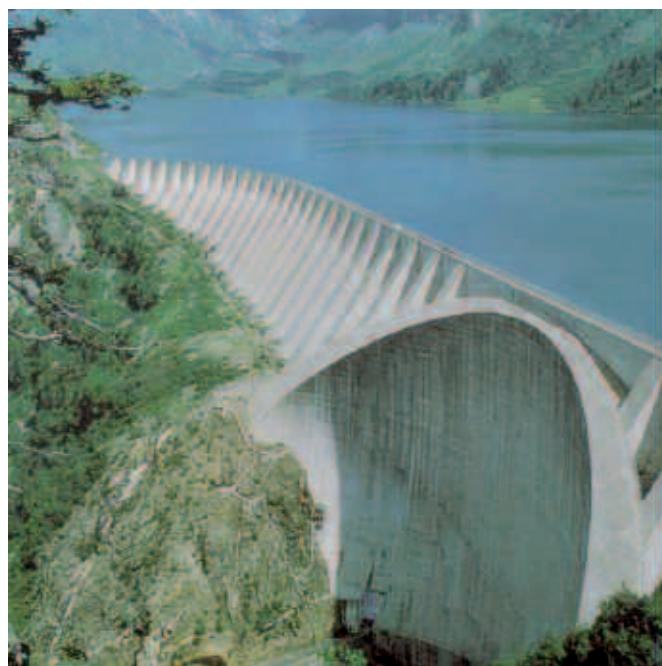


Figure 26. Barrage

des ouvrages. Leur pérennité, cruciale dans ce domaine, est d'ailleurs particulièrement à souligner.

Le métier de topographe a fortement évolué ces dernières années, grâce bien sûr aux apports considérables de l'informatique, mais aussi grâce aux nouvelles technologies de mesure et de communication. Celui du topographe ausculteur a suivi ces évolutions, avec une attention particulière à assurer la continuité des référentiels de mesure indispensables au suivi sur le long terme.

Des techniques les plus simples, comme le nivellement direct, au plus sophistiquées comme le GPS ou le scanner laser, la palette est large et les différentes manières de les mettre en œuvre et de les associer aux autres capteurs d'instrumentation augmentent encore leur capacité à répondre efficacement aux besoins des ingénieurs structure.

Il faut cependant garder à l'esprit que ces technologies aussi automatisées et sophistiquées soient-elles, doivent toujours être parfaitement dominées par leurs utilisateurs, sous peine de commettre des erreurs qui peuvent être lourdes de conséquences dans le domaine de la surveillance d'ouvrage. Cette maîtrise passe toujours par une très bonne connaissance des bases du métier de topographe et une connaissance approfondie de chaque outil et de son mode de fonctionnement. ●

Contacts

EDF DTG Service Topographie

Rémy BOUDON

remy.boudon@edf.fr

Michel TROUILLET

michel.trouillet@gmail.com

ABSTRACT

This article deals with the monitoring of the electric power stations belonging to EDF. The principles and the organization of the monitoring and surveying techniques currently used on different types of structures are presented.