

Comparaison technico-économique de différentes méthodes de mesures topographiques, en vue d'améliorer le système d'auscultation en place sur le barrage de Mirgenbach.

PFE présenté par : **Irène JACQUIN**
Société d'accueil : **Centre Régional d'Auscultation de Grenoble d'EDF – DTG**
Directrice de PFE : **Mme Elisabeth BARROS - MAUREL**
Correcteurs : **M. Jacques LEDIG**
M. Bertrand MERCKEL



1. Contexte de l'étude

Les barrages, comme tous les autres ouvrages d'art peuvent être un potentiel de risques significatifs tant sur le plan humain qu'environnemental. Les rares ruptures de barrages et de digues ont généralement des conséquences désastreuses. Un suivi régulier de leur comportement est nécessaire pour assurer une sécurité maximale et une anticipation de travaux. Ainsi, l'auscultation topographique prend une grande place dans le contrôle de ces ouvrages, et doit permettre un suivi des déplacements avec une précision adaptée au type d'ouvrage.

Le barrage de Mirgenbach, situé en Moselle à proximité de Thionville, est un barrage poids constitué d'une digue en remblai de type homogène en argile. La construction a été réalisée en 1980 pour assurer la création d'un réservoir de 7 millions de mètres cubes, annexe à la centrale nucléaire de Cattenom. Le terrain de fondation est un sol meuble fait de marne du Charmouthien. Pour ce type d'ouvrage, l'exigence métier, qui est la tolérance sur le positionnement absolu, a une valeur de ± 5 mm en x,y et z.

Le barrage est équipé d'un dispositif d'auscultation, mis en place afin de contrôler son comportement. Il est constitué de divers instruments de mesures, tels que des piézomètres, des cellules déterminant les sous pressions et des déversoirs mesurant les fuites, ainsi qu'un dispositif topographique planimétrique et altimétrique. Ce dernier est constitué de 9 piliers répartis autour du barrage, chacun équipé de deux cocardes et d'une plaque de centrage, ainsi que de 23 repères ouvrage, matérialisés par des cocardes, scellées sur des longrines en béton dans le remblai, portant également les rivets de nivellement.



Figure 1 : Photographie aérienne du barrage de Mirgenbach et des piliers du canevas

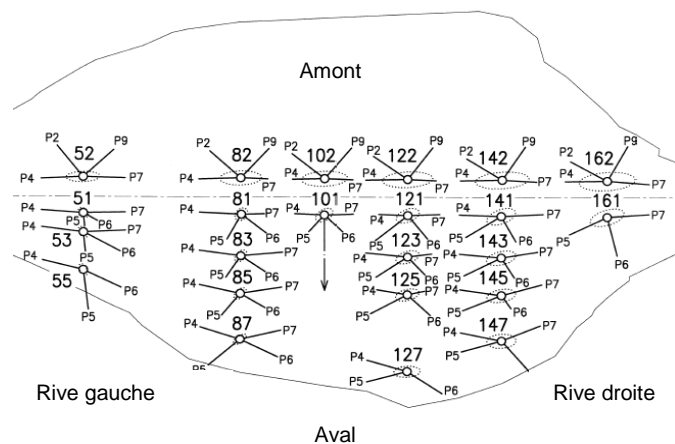


Figure 2 : Visualisation des visées sur repères ouvrage et des ellipses théoriques d'erreurs à 87 % pour une précision angulaire de 4.5 dmgon

Actuellement, l'auscultation topographique du réseau de Mirgenbach s'effectue uniquement par mesure d'angles horizontaux, selon des tours d'horizon bien déterminés, à une fréquence biannuelle (une mesure au printemps et une à l'automne). Pour effectuer le calcul de compensation du réseau, trois piliers du canevas (P3, P4 et P5) sont considérés comme fixe. Mais la précision obtenue sur les coordonnées compensées des piliers ainsi celles des repères ouvrage n'est pas satisfaisante. Les ellipses théoriques calculées par un logiciel du CRA – Gr, appelé GELI, en sont la preuve. La tolérance sur les repères ouvrage de ± 5 mm est dépassée pour 2/3 d'entre eux. L'autre problème du réseau de Mirgenbach concerne l'hypothèse de fixité des piliers P3, P4 et P5. Une étude de stabilité de réseau, utilisant la transformation d'Helmert, effectuée depuis la construction du barrage en 1980, prouve que deux d'entre eux (P4 et P5) subissent des déplacements de l'ordre de quelques millimètres, ce qui apporte en supplément de l'imprécision, une inexactitude dans la détermination des piliers du réseau et des repères ouvrage. De plus, l'augmentation de l'erreur moyenne quadratique du réseau durant ces dernières années, alors que la méthode de mesure est inchangée, confirme ce problème de stabilité.

2. Objectif du projet

L'objectif du projet de fin d'études est de trouver des solutions d'amélioration du réseau d'auscultation en utilisant des méthodes de mesures topographiques et en les comparant à la méthode actuellement utilisée pour en dégager des avantages et les inconvénients dans les buts suivants :

- améliorer la précision de détermination des piliers et des repères ouvrage afin qu'elle soit conforme à l'exigence métier.
- résoudre le problème d'instabilité des piliers de base du canevas, P3, P4 et P5, pour garantir la précision de détermination sur du long terme.

Intégrer les distances dans le réseau d'auscultation est une solution à examiner pour améliorer sa précision. Des tests de conception de réseau à partir d'observations théoriques, réalisés avec le logiciel LGO (Leica Géo Office), permettent de quantifier l'apport de la mesure de distance. La mesure GPS ou la mise en place de pendule inversé solidaire de piliers topographiques sont à envisager pour garantir la détermination des piliers de base du canevas en absolu.

3. Analyse du réseau actuel

	Avantages	Inconvénients
Mode opératoire : Méthode de triangulation	<ul style="list-style-type: none"> • pas de prisme à mettre en place • uniquement une mise en station de l'appareil et retrait des capots des cocardes, temps réduit avant la prise de mesure • possibilité de travailler à plusieurs équipes sans gêne car prise de mesures sur les cocardes 	<ul style="list-style-type: none"> • recherche et pointé des cocardes manuellement ce qui induit une perte de temps • automatisation partiel du processus avec un terminal de terrain • pas de prise de mesures de distance sur prisme donc pas de possibilité d'automatisation du pointé angulaire
Calculs : Les piliers sont calculés en bloc Les repères ouvrage sont calculés par intersections		<ul style="list-style-type: none"> • 3 visées minimales pour le calcul d'intersections des repères ouvrage pour une intersection favorable d'ou une nécessité de nombreux piliers répartis sur l'ensemble du site amont et aval • présence des visées longues au dessus de l'eau
Résultats	<ul style="list-style-type: none"> • les piliers fixes sont proches du barrage ce qui limite l'imprécision de la mesure sur les repères ouvrage et piliers proches du barrage 	<ul style="list-style-type: none"> • ellipses supérieures à l'exigence métier sur les piliers éloignés du barrage et sur les repères ouvrage
Contrôle de la fixité du canevas		<ul style="list-style-type: none"> • imprécision trop importante pour contrôler la fixité du réseau • sans mesure de distance, la mise à l'échelle du réseau repose uniquement sur 3 points fixes

Tableau 1 : Avantages et inconvénients du réseau actuel

4. Amélioration de la précision du réseau de Mirgenbach

Le CRA-Gr utilise le logiciel GELI, développé par le service dans les années 80, pour calculer les ellipses théoriques d'un réseau. Ce dernier ne permet pas d'intégrer les mesures de distance dans le calcul contrairement au logiciel LGO qui dispose d'un outil de conception de réseau complet (angle, distance, ligne de base GPS...) à partir des observations théoriques et de la précision a priori des appareils.

Au préalable, nous avons réalisé une comparaison d'ellipses théoriques issues des deux logiciels cités précédemment en partant des mêmes hypothèses de fixité. Les résultats sont similaires, ± 1 mm au maximum sur le demi-grand axe des ellipses, ce qui permet de valider la méthode de calcul du logiciel LGO et de l'utiliser pour la suite du projet.

4.1. Intégration des mesures de distance dans le canevas du réseau actuel

Dans un premier temps, des tests ont été réalisés sous LGO en intégrant 22 distances au sein du canevas.

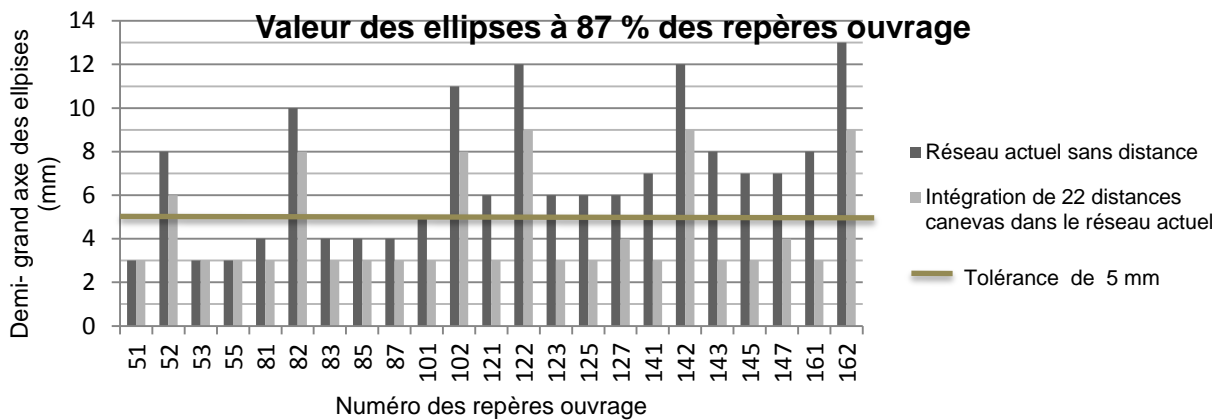


Tableau 2 : Comparaison des demi-grands axes des ellipses en intégrant 22 distances canevas

Le gain est significatif mais 6 repères ouvrage sur 23 sont encore hors tolérance, ce qui représente un gain de 40 %. La précision est certes améliorée mais les contraintes organisationnelles apportées par la mesure des distances ne sont pas négligeables. Du fait de l'étendu du site, la mise en place des prismes sur pilier avant la prise de mesure est longue. Ajoutons à cela, l'orientation des prismes qui doit être changée à chaque nouvelle station.

4.2. Conception d'un nouveau réseau

Pour limiter les contraintes liées à la prise de mesure des distances sur le barrage de Mirgenbach, l'idée est de concevoir un nouveau réseau répondant aux objectifs suivants :

- ✓ réduire le nombre de piliers
- ✓ limiter la longueur des portées
- ✓ éviter les visées au dessus de l'eau
- ✓ positionner des prismes sur l'ouvrage qui est accessible pour permettre l'automatisation des mesures

Un nouveau canevas d'auscultation est constitué des piliers P3, P4 et P7 (cf. figure 3). Les visées sur les repères ouvrage s'effectuent depuis les stations P4 et P7.

Par intégration des angles et des distances au sein du canevas et sur les visées ouvrage, les tests sous LGO concluent que l'exigence métier est respectée pour tous les repères ouvrage. De plus, la durée des mesures est réduite car le nombre de visées est diminué.

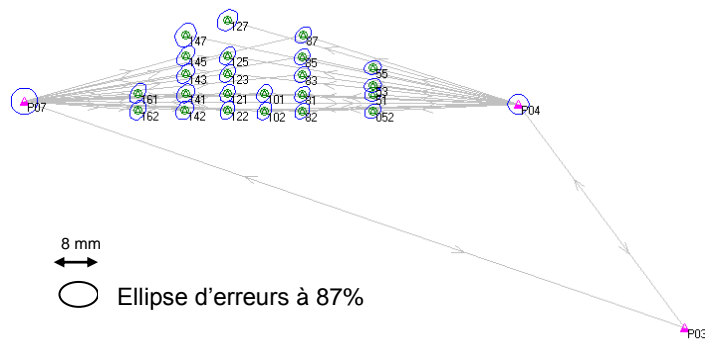


Figure 3 : Nouveau réseau d'auscultation

5. Résoudre le problème d'instabilité des piliers de référence

5.1. Détermination des piliers du canevas au GPS

La mesure GPS en mode statique est une première solution à envisager pour résoudre le problème d'instabilité des piliers de base du canevas, P3, P4 et P5 afin de garantir la précision de détermination sur du long terme. La centrale nucléaire de Cattenom, située à deux kilomètres du barrage, possède un réseau d'auscultation constitué de 3 piliers réputés fixes (20075, 20144, 20026,).

Ainsi un canevas GPS peut être défini, il est constitué des piliers fixes (20075, 20144, 20026, P3, cf. figure 4) et des piliers P4, P7 à déterminer. Des tests sous LGO ont été réalisés pour quantifier la précision de détermination des piliers P4, P7 constituant le nouveau réseau d'auscultation du barrage. Pour ce faire, un écart type a priori sur la ligne de base GPS, de 2 mm +2 pmm a été défini. La précision obtenue pour un niveau de confiance de 1σ est de 2mm pour P4 et 2.2mm pour P7. La précision des lignes de base GPS semble toutefois surestimée en la comparant à des observations terrains réalisées avec une session d'une durée de 24 heures. Si l'on intègre les imprécisions de mesure GPS dans le calcul de simulation global du nouveau réseau, l'exigence métier est encore respectée pour l'ensemble des repères ouvrage. (cf. figure 3)

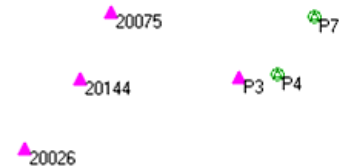


Figure 4 : Canevas GPS

5.2. Le pendule inversé

Le pendule inversé est un instrument de mesure généralement utilisé pour l'auscultation des ouvrages en béton. Il est constitué d'un fil d'acier, tendu verticalement dans un forage entre un point bas solidaire des fondations de l'ouvrage et un point haut solidaire d'un flotteur reposant dans une cuve et libre de se déplacer horizontalement. La table de lecture située en haut, suit les mouvements du terrain. Le déplacement de la table par rapport au point bas fixe correspond au déplacement du terrain. Cette technique de mesure peut être placée solidaire d'un pilier. Les coordonnées du pilier sont corrigées des mouvements déterminés par le pendule afin d'obtenir des coordonnées fixes à intégrer dans le calcul. Ce principe de mesure est très précis (0.2 mm), et la prise de mesure est aisée. Par contre, le coût de l'installation n'est pas négligeable, de l'ordre de 60 000 euros pour la construction d'un pendule inversé dont la longueur du forage est de 25 mètres. De plus, un entretien régulier est nécessaire pour garantir la pérennité de l'installation.

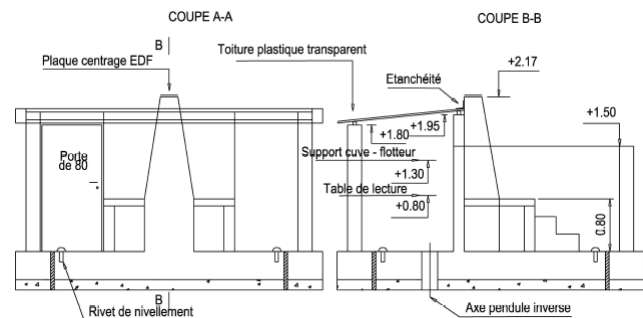


Figure 5 : Pilier équipé d'un pendule inversé

6. Conclusion et perspectives

Les tests de simulation de réseau ont permis de dégager une première amélioration de la détermination des repères ouvrage par intégration des distances dans le canevas actuel. Mais cette technique de mesure ajoute des contraintes organisationnelles pour un site étendu comme celui de Mirgenbach. La définition d'un nouveau réseau d'auscultation plus proche du barrage permet une réduction ces contraintes. La longueur des portées étant diminuée et évitant le plan d'eau, l'ajout des mesures de distance, au sein du canevas mais également sur les repères ouvrage est pertinente. Cette approche aboutit à une détermination des repères ouvrage satisfaisante sur les déplacements, qui respecte l'exigence métier de ± 5 mm, mais qui reste à caler en absolu. Le GPS statique permet un rattachement aux piliers fixes de la centrale nucléaire avec une précision suffisante des piliers du canevas du barrage. Le pendule inversé installé solidaire d'un pilier topographique est une technique de mesure alternative au GPS. Contrairement à ce dernier, l'installation est permanente et la précision est plus importante mais le coût de mise en place est élevé. Le choix se fera sur le bilan économique global des deux solutions.

Les techniques de mesures citées précédemment ont révélé leur efficacité sur le barrage de Mirgenbach mais elles peuvent s'appliquer à des ouvrages similaires ayant les mêmes problématiques.