

# Organisation de la surveillance de la mise en eau d’ouvrages hydrauliques et utilisation innovante de fibres optiques : exemple de la remise en eau du canal de Curbans après réhabilitation lourde et de la première mise en eau du barrage de Rizzanèse

*Organization of hydraulic structures surveillance during first impounding and innovative use of optical fibers: Case studies of Curbans Canal filling after large upgrading works and Rizzanese dam during first filling*

**François Delorme, Jean-Robert Courivaud, Pierre Carliz, Eric Bourdarot**

EDF CIH Savoie Technolac 73373 Le Bourget du Lac Cedex L

[francois.delorme@edf.fr](mailto:francois.delorme@edf.fr), [jean-robot.courivaud@edf.fr](mailto:jean-robot.courivaud@edf.fr), [pierre.carliz@edf.fr](mailto:pierre.carliz@edf.fr), [eric.bourdarot@edf.fr](mailto:eric.bourdarot@edf.fr)

**Stanislas Créneau, Bruno Daumas**

EDF CIH 10 av. Viton 13482 Marseille Cedex 20

[stanislas.creneau@edf.fr](mailto:stanislas.creneau@edf.fr), [bruno.daumas@edf.fr](mailto:bruno.daumas@edf.fr)

**Yves-Laurent Beck**

EDF DTG 21 av. de l’Europe BP 41 Grenoble Cedex 09

[yves-laurent.beck@edf.fr](mailto:yves-laurent.beck@edf.fr)

**Christophe Rieux**

EDF DTG 62 bis rue Raymond IV Toulouse cedex 06

[christophe.rioux@edf.fr](mailto:christophe.rioux@edf.fr)

**Patrick Pinettes**

GeophyConsult Savoie Technolac – 12, allée du lac de garde – B.P. 231 – 73374 Le Bourget du Lac Cedex

[pinettes@geophyconsult.com](mailto:pinettes@geophyconsult.com)

## MOTS CLÉS

Auscultation, barrage, canal, mise en eau, surveillance, fibre optique

## RÉSUMÉ

*La première mise en eau d’un ouvrage hydraulique ou sa requalification après des travaux importants représente une étape clé. Elle doit être préparée et suivie avec une attention toute particulière. Pour le canal de Curbans, son revêtement étanche en béton bitumineux, son dispositif de drainage et de surveillance des fuites ont été totalement réhabilités. La préparation de la remise en eau et l’organisation de la surveillance ont fait l’objet de procédures pour garantir en permanence la maîtrise de la sûreté de l’ouvrage. Les travaux entrepris ont été l’occasion de moderniser la maintenance préventive de cet ouvrage avec mise en place d’un système innovant, par fibres optiques, de détection des fuites, basé sur des mesures réparties de températures, et de surveillance des déformations. Le barrage du Rizzanèse est un barrage poids en BCR d’une hauteur de 40,5 m. Outre un dispositif d’auscultation classique, ce barrage a été doté pour la première fois à EDF, à titre expérimental, de fibres optiques permettant de suivre la température et les déformations au sein de l’ouvrage au cours de sa construction et durant la mise en eau. Cette première mise en eau du barrage fait l’objet d’une surveillance renforcée. Les mesures d’auscultation sont suivies et analysées au moyen du nouveau logiciel de gestion et d’analyse des mesures d’auscultation, KOALA, géré par EDF-DTG. La communication présente également les modalités d’organisation particulière adoptées en cas d’écart avéré sur les mesures ou de désordre sur le barrage.*

## ABSTRACT

*First impounding of a new dam or upgraded hydraulic structures is a key stage. It must be prepared and followed with all necessary care. For Curbans canal, bituminous concrete lining, drainage and leakage monitoring system have been entirely upgraded. First filling preparation and surveillance organization have been described in specific procedures in order to guarantee at any time dam safety assessment. Works performed have permitted to modernize the preventive maintenance of this structure with installation of an innovative system based on optical fibers for leakage detection through equally spaced temperature measurements and settlements monitoring. Rizzanèse dam is a 40.5 m high RCC gravity structure. In addition to its traditional instrumentation system, this dam has been equipped with an experimental optical fibers system, the first experience at EDF, for monitoring temperature and deformations during construction and first filling. Monitoring measurements have been managed and assessed using the new monitoring KOALA software operated by EDF-DTG. The paper also presents specific organization procedures implemented for facing to singular measurements or defects observed on the dam.*

## 1. ORGANISATION DE LA SURVEILLANCE PENDANT LA REMISE EN EAU DU CANAL DE CURBANS APRES D’IMPORTANTES TRAVAUX DE REHABILITATION

### 1.1 Description générale de l’ouvrage

Le canal de Curbans, construit entre 1964 et 1965, se situe pour sa plus grande partie dans le département des Hautes Alpes (05). Ce canal, de 5 200 m environ de longueur, peut transiter 220 m<sup>3</sup>/s. Il est typique des canaux de la Durance : largeur du plat fond 9 m, pente longitudinale 0,3 %, fruits des talus intérieurs de 2/1 et tirant d’eau normal de 8 à 10 m.

Son revêtement étanche, qui était composé de 1 à 2 couches de béton bitumineux, a dû subir une réfection complète. Elle a consisté en la pose, sur le revêtement d’origine rénové, d’une couche de 10 cm de béton bitumineux drainant puis d’une couche de 8 cm de béton bitumineux étanche. Afin d’assurer une surveillance optimale du canal, son dispositif de drainage a été totalement rénové. Environ 10 km de drains ont été installés sous le radier et 9 exutoires (Figure 1) sous le canal ont été créés ou aménagés pour permettre la sortie des eaux de drainage et leur mesure en 31 points différents dans 9 exutoires.



*Figure 1 : Vue en plan du canal (écoulement de la droite vers la gauche)  
Positionnement des 9 exutoires des débits de drainage dont chacun possède un nom spécifique*

### 1.2 Préparation de la remise en eau

La remise en eau du canal de Curbans après une modification en profondeur de son étanchéité était le point clef du projet car elle devait à la fois permettre de vérifier la qualité du travail effectué (qualité de l’étanchéité) et permettre un retour à l’exploitation normale de l’aménagement, après 10 ans de restriction sur la cote maximale d’exploitation, dans des conditions de sûreté optimales. Ainsi, la préparation de cette remise en eau a débuté 1 an avant sa date effective, basée sur des protocoles spécifiques internes EDF qui associent étroitement l’exploitant et l’ingénierie.

Elle a abouti à :

- la mise en place d’une organisation spécifique à l’intérieur même du projet Curbans, par la nomination d’un Pilote Opérationnel Coordonateur des Essais et d’un Chargé d’Essai dont les missions et les responsabilités étaient clairement définies dans un PGE (Plan Global d’Essais), document d’organisation qui gouverna l’ensemble du déroulement de la remise en eau. A noter que le PGE a reçu formellement l’approbation de l’autorité de contrôle (DREAL PACA) pour pouvoir débiter la remise en eau du canal ;
- la mise au point du protocole de montée du plan d’eau (gradients et paliers) ainsi qu’à la définition de la surveillance à réaliser et aux schémas décisionnels qui en résultent pour tous les scénarii envisagés afin de garantir en permanence la maîtrise de la sûreté de l’ouvrage. L’ensemble de ces éléments techniques ont été consignés dans le cahier d’essais, document de référence utilisé tout au long du déroulement du processus.

Cette remise en eau était composée de deux phases avec deux buts bien distincts :

- la requalification intrinsèque du canal, qui correspond à sa capacité à contenir de l’eau en toute sûreté,

- la requalification fonctionnelle du canal, qui correspond à sa capacité à faire transiter de l’eau dans le respect de son mode d’exploitation (intumescences non débordantes, lignes d’eau conformes au codage des pilotes automatiques, etc.).

La suite de l’article ne traite que de la requalification intrinsèque.

### **1.3 Organisation**

La remise en eau du canal a donc nécessité une organisation rigoureuse et a été pilotée en temps réel par les résultats de l’auscultation issus du dispositif conventionnel de mesure. En effet, les dispositifs expérimentaux de mesures par fibre optique (détection de fuites et de déformation) ont été testés grandeur nature et ils ont pu être comparés aux mesures physiques de débit (voir § 2 de cet article). Ils ont donc joué un rôle d’aide à la localisation des fuites pour réparation, mais n’ont pas servi au pilotage opérationnel de la remise en eau.

L’organisation reposait sur la mise en place de trois équipes de surveillance qui fonctionnaient en 3\*8 pour la réalisation des mesures et leur diagnostic en temps réel ainsi que pour le pilotage de la montée de la cote. Chaque équipe était constituée d’un chargé d’essais, responsable du pilotage en temps réel, d’au moins deux techniciens prenant les mesures et réalisant les inspections visuelles et d’un chargé de conduite en charge de la manœuvre des vannes d’entrée canal pour la régulation de la montée du plan d’eau.

Toutes modifications du protocole de remise en eau devaient avoir l’approbation du Pilote Opérationnel Coordonnateur des Essais en astreinte permanente.

Le pilotage en temps réel était basé sur la réalisation d’inspections visuelles et de mesures de nivellement, de piézométrie, de débits de drainage et du plan d’eau. Pour chaque phénomène mesuré, des seuils étaient définis, en fonction de la cote, qui déterminaient des actions à engager : soit la poursuite de la montée de la cote, soit la réalisation d’un palier ou soit la vidange du canal.

La requalification intrinsèque du canal ne pouvait être prononcée que seulement si tous les critères étaient respectés.

### **1.4 Principes du déroulement**

Les inspections visuelles portaient sur l’ensemble du canal, c’est-à-dire les talus extérieurs, le revêtement intérieur visible, les points singuliers (ponts, entonnements, etc.) et les ovoïdes passant sous le canal. Elles avaient pour but de détecter, lors de la montée du plan d’eau d’éventuelles anomalies structurelles.

La mesure de nivellement devait déterminer les éventuels mouvements des berges entre le début de la mise en eau et le moment où le canal reviendrait à sa cote maximale d’exploitation.

Les mesures de piézométrie avaient pour but de déterminer si la remise en eau du canal avait une incidence sur les niveaux de la nappe par cause d’éventuelles fuites importantes.

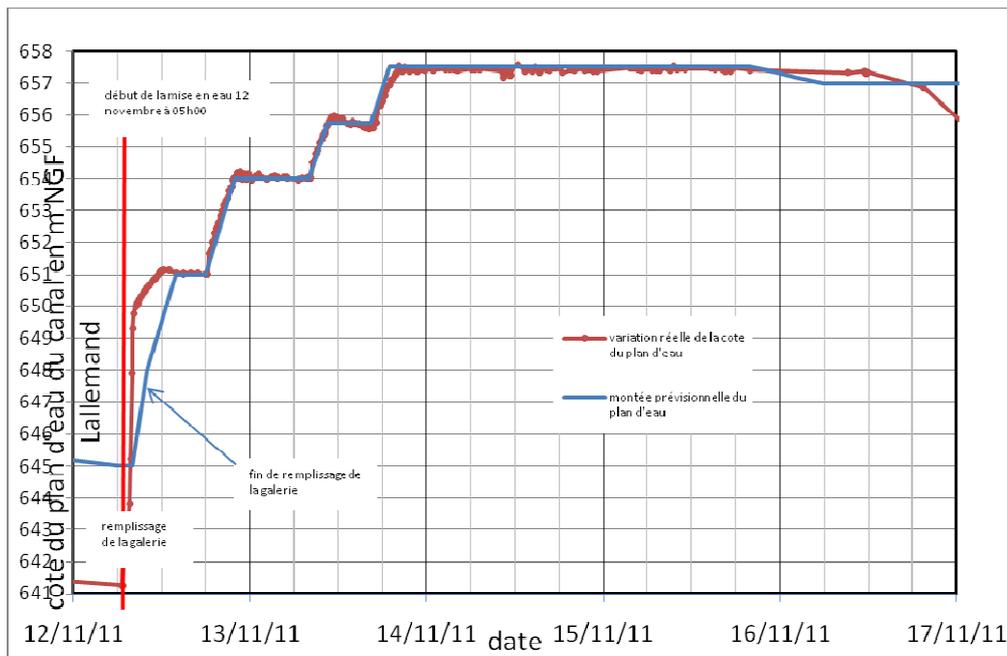


Figure 2 : Variations prévisionnelles et réelles du plan d'eau lors de la troisième phase de mise en eau

Les mesures des débits de drainage permettaient de vérifier la qualité de la nouvelle étanchéité et la localisation des éventuelles fuites afin de les réparer si nécessaire.

Enfin, la mesure de la cote du plan d'eau permettait de s'assurer du respect du protocole de montée du plan d'eau et d'ajuster l'ouverture des vannes entrée canal (Figure 2).

Ce sont bien évidemment les mesures des débits de drainage, réalisées 24h/24h, qui ont été au cœur du pilotage de la montée du plan d'eau et qui ont permis de prendre, en temps réel (de jour comme de nuit), les décisions d'arrêt ou de poursuite de la mise en eau en fonction de critères prédéfinis.

### 1.5 Requalification intrinsèque

La requalification intrinsèque du canal a nécessité trois montées du plan d'eau (Figure 4) et deux vidanges pour réaliser des travaux complémentaires. Elle a été prononcée le 15 novembre 2011 à 20 h, une fois que l'ensemble des critères requis ont pu être respectés.

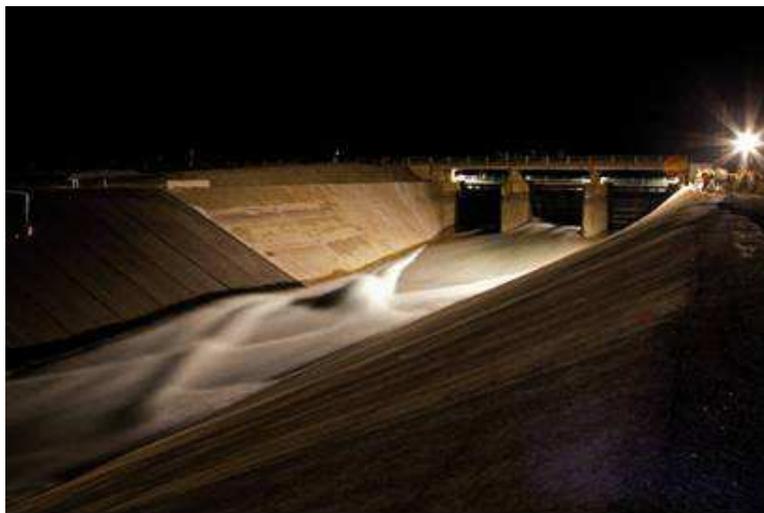


Figure 3 : Vue du début de remplissage au niveau des vannes entrée canal

Lors du premier remplissage du canal, le 4 octobre, les mesures de débit ont très rapidement mis en évidence un important taux de fuites, dépassant très largement les critères fixés. Les investigations menées ont conclu à la nécessité de reprendre une partie des joints froids du revêtement étanche.

La deuxième montée du plan d'eau a permis d'atteindre en toute sûreté la cote maximale d'exploitation du canal. Malgré la très grande diminution (division par 10) des débits par rapport à la première montée, les débits collectés en certains points demeuraient largement au-dessus des critères fixés pour une exploitation à long terme du canal. Les points concernés étaient les points singuliers de l'ouvrage : passages sous les ponts et rampe permanente d'accès au fond du canal. Dans ces zones le revêtement étanche avait été posé « manuellement ». Une deuxième couche de revêtement étanche a donc été posée sur ces zones.

La troisième montée a permis de confirmer l'efficacité du dernier traitement puisque les débits ont été divisés par 4 au moment de la prononciation de la requalification intrinsèque le 15 novembre à 20 h. Une semaine plus tard, les débits n'étaient plus que de l'ordre de 500 l/min et 6 mois plus tard (mai 2012), ils étaient tombés à 30 l/min.

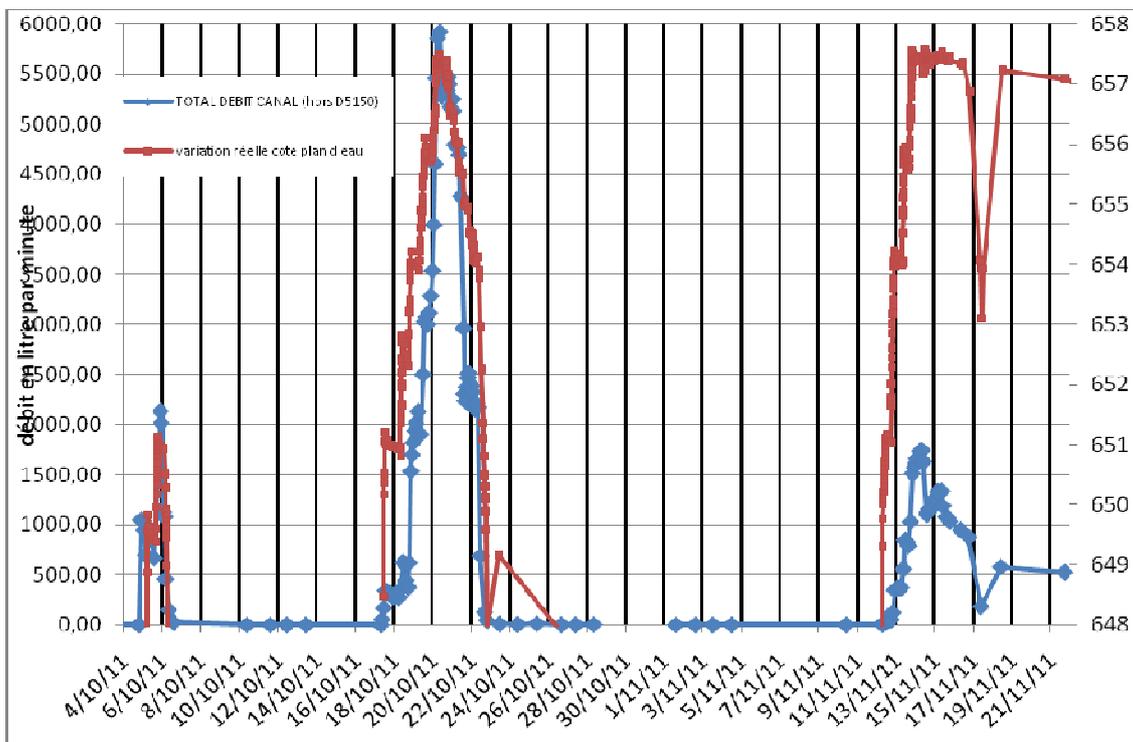


Figure 4 : Evolution du total des débits drainés lors des 3 phases de montée du plan d'eau

## 1.6 Conclusion

Ainsi, l'auscultation et la surveillance exercées, pendant la remise en eau, ont permis :

- de garantir, en permanence, en temps réel et pour toutes les cotes du niveau d'eau atteintes dans le canal, la sûreté de l'ouvrage, dans cette phase de requalification,
- de cibler les zones d'intervention et de définir les types de travaux complémentaires de finition à réaliser sur le revêtement étanche, pour atteindre les performances recherchées.

## **2. CONCEPTION, REALISATION ET EXPLOITATION D'UN SYSTEME DE SURVEILLANCE DES FUITES ET DES DEFORMATIONS PAR FIBRE OPTIQUE SUR LE CANAL DE CURBANS**

### **2.1 Objectifs des installations de surveillance des fuites et des déformations par fibre optique sur le canal de Curbans**

Le contrôle de l'étanchéité du canal est assuré, au niveau du système d'auscultation conventionnelle, par des mesures de débit des fuites collectées le long des tranchées drainantes par des collecteurs qui ressortent dans des chambres de mesures réparties le long de l'ouvrage. Le linéaire sur lequel les fuites sont collectées au niveau de chaque chambre de mesure est en moyenne de 320 m. Si ce système d'auscultation conventionnelle permet des mesures directes et assez précises des écoulements traversant l'étanchéité du canal, en revanche, il ne permet pas de les localiser très précisément : si un débit anormal est identifié dans une chambre de mesure, la seule information sur la position du (ou des) défaut(s) de l'étanchéité est qu'il(s) se trouve(nt) à l'intérieur d'un tronçon identifié qui peut être compris entre 175 m et 800 m de longueur.

Afin de compléter ce dispositif conventionnel, une auscultation des fuites par mesures réparties de température par fibre optique a été installée sur tout le linéaire de l'ouvrage afin d'être en mesure de détecter des fuites et de déterminer leur position avec une résolution spatiale de 1 m. Ce système innovant de détection et de localisation des fuites à travers une étanchéité amont de canal a donc pour objectif de préciser l'information fournie par l'auscultation conventionnelle de mesure de débit : alors que l'auscultation conventionnelle fournit une information de débit de fuite qui est intégratrice sur le linéaire de chaque tronçon de drainage, la fibre optique permet de préciser cette information en localisant au mètre près les secteurs où des venues d'eau atteignent la tranchée drainante.

Par ailleurs, un secteur d'environ 2 km de longueur, caractérisé par une fondation gypseuse proche, présente un risque de déformations sous le radier du canal dues à la dissolution des gypses par des circulations d'eaux souterraines et, dans le cas le plus grave, de remontée d'un fontis. Aucun moyen d'auscultation conventionnelle n'étant en mesure de suivre ces déformations lorsque le canal est en eau, ce secteur a été équipé, à titre expérimental, d'une surveillance des déformations par fibre optique : une fibre optique de déformation a été installée sous le radier du canal, au contact avec le toit de la fondation. Cependant, cette technologie n'en est encore qu'au stade de la recherche et développement et n'a pas encore fait l'objet d'une qualification sur des ouvrages réels. Plusieurs questions relatives à la mise en œuvre de cette technologie restent à résoudre (notamment le passage de la déformation mesurée par la fibre optique à la déformation du câble qui entoure la fibre, puis le passage de la déformation du câble à la déformation du sol qui l'entoure, puis le passage de la déformation du sol à un vecteur de déplacement de ce sol). Aussi, cette installation de surveillance des déformations par fibre optique sous le radier du canal n'a pour l'instant qu'une vocation expérimentale.

### **2.2 Conception de l'installation de surveillance des fuites par fibre optique**

Les fibres optiques de mesure des températures ont été positionnées en pied du parement intérieur, le long des deux rives du canal, sur la totalité du linéaire, soit environ 11 km de fibres optiques de température (Figure 5). Elles ont été placées dans la tranchée drainante, au sein d'un béton de ciment drainant, au-dessus du collecteur de drainage (Figure 6). Le choix de cet emplacement a été guidé par la nécessité de positionner la fibre optique au point où elle aura le plus de chance de se trouver à proximité de l'écoulement qui, après être passé à travers l'étanchéité, aura percolé le long de la couche drainante pour arriver par gravité jusqu'à la tranchée drainante. Le câble de la fibre optique a été sélectionné pour ne pas subir de dommage au cours de sa mise en œuvre dans le béton de ciment.

La position précise de la fibre optique dans la tranchée drainante a été déterminée à l'aide d'une modélisation thermo-hydraulique aux éléments finis (Figure 7). Utilisant comme conditions aux limites des données de température de l'eau du canal, de l'air et de l'eau de la nappe phréatique mesurées sur site durant plusieurs mois, cette modélisation a permis de simuler les valeurs de température mesurées par la fibre optique au sein de la tranchée drainante. Ces valeurs de température ont ensuite été utilisées comme données d'entrée des modèles EDF d'analyse des mesures de température par fibre optique afin de valider la capacité de ces modèles à détecter et localiser correctement une anomalie de température due à une fuite au sein de l'étanchéité. Cette méthode a permis de justifier à quelle hauteur sous l'étanchéité devait être positionnée la fibre optique de température.

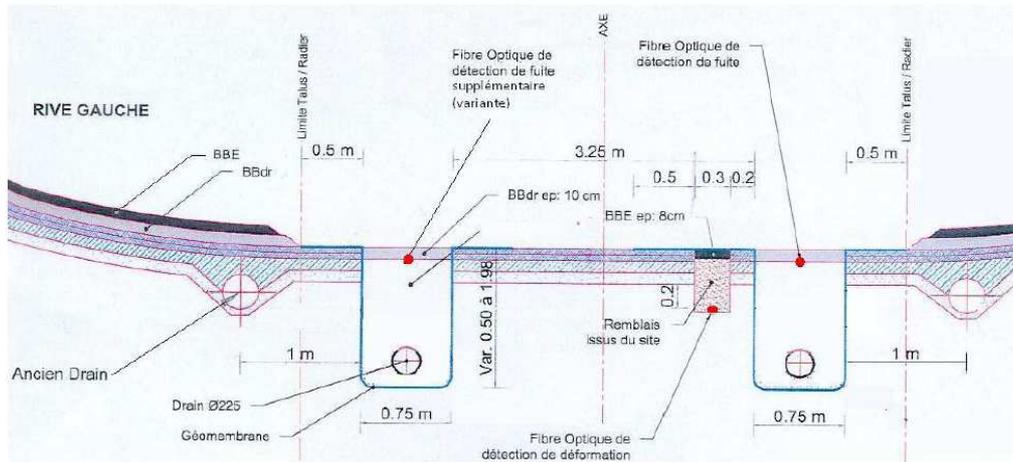


Figure 5 : Position des fibres optiques de température dans chaque tranchée drainante

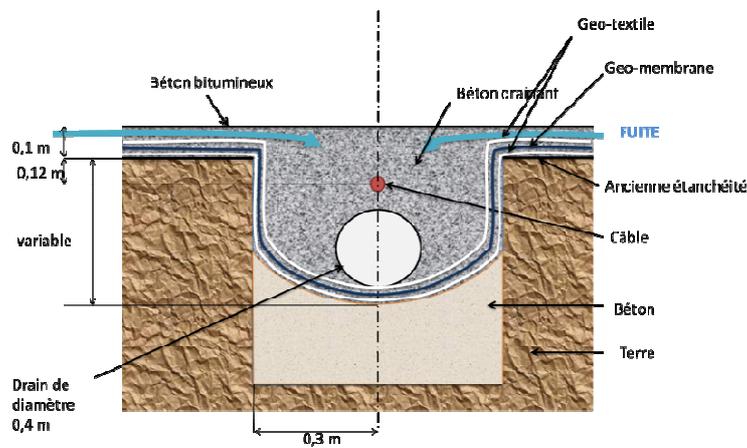


Figure 6 : Schéma d’une coupe transversale de la tranchée drainante avec la fibre optique de température

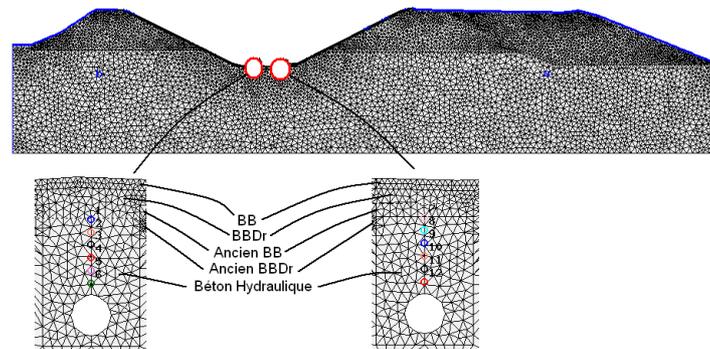


Figure 7 : Maillage éléments finis de la modélisation thermo-hydraulique du canal de Curbans et zoom sur les deux tranchées drainantes avec plusieurs positions testées pour la fibre optique

Du fait du double objectif de surveiller les fuites au cours de périodes courtes comme les périodes de remise en eau du canal et également sur le long terme en phase d’exploitation courante, le choix a été fait de pouvoir utiliser les deux méthodes de détection des fuites par mesures de température par fibre optique, à savoir la méthode passive (utilisation directe des mesures de température de la fibre) et la méthode de chauffe (des câbles de cuivre entourent la fibre optique la chauffent par effet Joule et l’on mesure la décroissance de cette température après chauffe, variable selon qu’elle sera influencée ou non par une fuite). La puissance de chauffe nécessaire pour mettre en œuvre cette méthode est de 11 W/m, ce qui a conduit à mettre en œuvre et concevoir des équipements électriques répartis dans plusieurs chambres de mesure, le long du canal (Fig. 8).

Chaque chambre de mesure était équipée :

- d'un groupe électrogène triphasé délivrant une tension de 400 V, accompagné d'une cuve à fioul ;
- d'un transformateur permettant d'élever la tension à 690 V ;
- d'une armoire de contrôle (conçue spécialement pour cette installation) permettant de contrôler la puissance injectée dans quatre câbles simultanément. Chaque armoire permet de chauffer simultanément les quatre câbles qui y sont connectés, avec une puissance fixée par l'utilisateur entre 0 et 11 W/m et ce, pour une durée variable à fixer par l'opérateur.

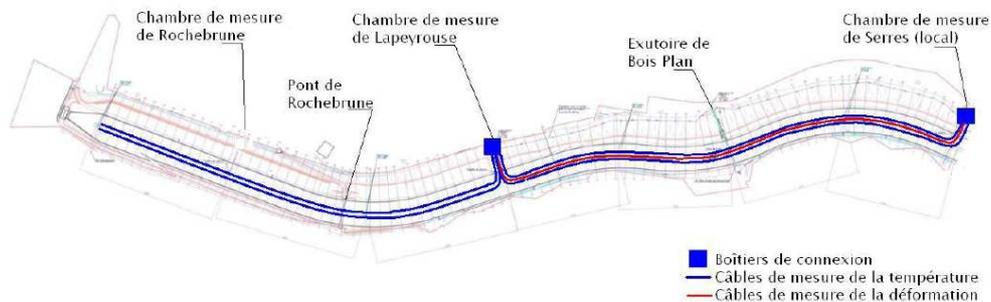


Figure 8 : Tracé des lignes de fibres optiques et localisation des chambres de mesures entre les PM 3 380 et 5 180

### 2.3 Travaux de réalisation des installations de surveillance par fibre optique

Les travaux de réalisation des installations de surveillance par fibre optique se sont déroulés de fin mai à fin septembre 2011. Ils ont débuté par la réception des câbles de fibre optique préalablement à leur pose (vérification de la conformité des câbles aux spécifications).

L'installation des câbles de fibre optique a consisté à :

- disposer les câbles de mesure de la température dans les nouvelles tranchées drainantes, après la mise en œuvre du béton de ciment drainant (Figure 9) et avant la mise en place du béton bitumineux drainant ;
- disposer les câbles de mesure de la déformation dans une tranchée remplie de remblais issus du site (Figure 10), pratiquée sous l'ancienne étanchéité avant la mise en place de la nouvelle.



Figure 9 : Atelier d'installation des fibres optiques de mesure de la température



Figure 10 : Atelier d'installation des fibres optiques de mesure des déformations

La réalisation de l'installation de surveillance par fibre optique n'a entraîné aucun retard sur le planning du chantier de réfection de l'étanchéité et du drainage du canal de Curbans.

Le coût de la conception et de la réalisation de cette installation de surveillance par fibre optique, incluant les installations de mesure des fuites et des déformations, mais hors coûts de génie civil liés directement aux travaux de réfection, est de 34,5 €/m. Ce coût a été conforme aux prévisions.

## 2.4 Exploitation de la surveillance des fuites par fibre optique au cours de la remise en eau du canal

La première remise en eau du canal de Curbans s'est effectuée par paliers de niveaux d'eau à partir du 4/10/2011. Les mesures de température par fibre optique par la méthode de chauffe ont été effectuées sur des durées de 2 heures pour chaque palier.

Sous 2,75 m de charge d'eau moyenne, le débit cumulé de fuites tout le long du canal a atteint 2 200 l/min, dont un tronçon qui débitait plus de 1 000 l/min. Seuls deux tronçons ne fuyaient pas sur tout le canal. Le canal a alors été vidangé pour réparations, mais il était impossible de déterminer où se trouvaient les zones à réparer à partir des inspections visuelles et de l'auscultation conventionnelle. Les données des mesures de chauffe par fibre optique ont permis de localiser les défauts, qui étaient situés généralement au niveau de « points triples », joints mal compactés entre des surfaces d'étanchéités du radier et du parement. La surveillance par fibre optique a donc eu un apport déterminant dans la capacité à localiser rapidement les zones très localisées qui étaient à l'origine des débits de fuite les plus importants.

Au cours des deux phases suivantes de remise en eau (17/10 au 20/10 et 12/11 au 14/11), les résultats de la surveillance des fuites par fibre optique ont fait apparaître les points suivants :

- sur les tronçons avec des fuites fortes mesurées par les drains (débit linéique  $> 0,1$  l/min/m), il y a eu systématiquement une détection par la fibre optique ;
- sur les tronçons marqués par une absence de fuite, il n'y a pas eu de détection de fuite par la fibre optique ;
- sur les tronçons caractérisés par des fuites faibles (débit linéique  $< 0,1$  l/min/m), les résultats de la détection de fuites par fibre optique sont variables. Cette variabilité peut trouver deux explications :
  - + Soit il s'agissait de fuites diffuses avec un débit linéique très faible et non de fuites concentrées et de ce fait, très difficiles à détecter par les méthodes de fibre optique (elles peuvent ne pas « atteindre » la fibre située au centre de la tranchée de drainage) ;
  - + Soit les modèles EDF de détection des fuites par fibre optique restent à améliorer pour ce type de fuites faibles.

## 2.5 Exploitation de la surveillance des fuites par fibre optique depuis la fin de la remise en eau

L'exploitation courante du canal de Curbans a repris sa requalification le 15/11. Les fuites ont baissé régulièrement depuis cette date, pour devenir très faibles depuis début 2012, probablement du fait du colmatage du fond du canal par les limons transportés en suspension. L'analyse des données de température acquises sur la période du 15/11/2011 au 29/12/2011 a permis de détecter des fuites et de les corroborer avec les tronçons pour lesquels les débits de drainage étaient significatifs. En revanche, à partir de début 2012, les débits de drainage étant devenus très faibles (débits linéiques de l'ordre de 0,01 l/min/m voire inférieurs), les méthodes d'analyse des données de fibre optique ne permettent plus de localiser des fuites.

La comparaison entre les mesures de débit de drainage, pour chaque tronçon du canal, et les détections de fuite par fibre optique sont présentées dans le Tableau 1 (rive gauche) et le Tableau 2 (rive droite).

Nom du tronçon	PM amont tronçon	PM aval tronçon	Débit de fuite (l/min) mesuré par collecteur	Débit de fuite linéique par collecteur (l/min)	Localisation détection fibre optique par méthode active (PM)	Localisation détection fibre optique par méthode passive (PM)
Gréoliers	40	819	118,37	0,15	-	617, 624, 619
La Scie	819	1286	17,00	0,04	-	-
	1286	1602	0,60	0,00	-	-
Magdeleine	1602	1930	0,70	0,00	1609	-
Bussac	1930	2248	6,30	0,02	-	-
	2248	2582	1,15	0,00	-	-
Bréziers	2582	2912	0,25	0,00	-	-
	2912	3147	135,32	0,58	-	3106 à 3111, 3116 à 3117
Serres	3147	3382	82,85	0,35	3151 à 3161	3154 à 3155, 3263
	3382	3602	2,00	0,01	-	3561
Bois du Plan	3602	3842	1,70	0,01	-	-
	3842	4066	0,50	0,00	-	-
Lapeyrouse	4066	4293	6,00	0,03	-	4255
	4293	4551	0,20	0,00	-	-
Rochebrune	4551	4862	20,00	0,06	-	-
	4862	5139	20,00	0,07	-	-

Tableau 1 : Débits de fuite mesurés et détection des fuites par fibre optique du 15/11/2011 au 29/12/2011 en rive gauche.

Nom du tronçon	PM amont tronçon	PM aval tronçon	Débit de fuite (l/min) mesuré par collecteur	Débit de fuite linéique par collecteur (l/min)	Localisation détection fibre optique par méthode active (PM)	Localisation détection fibre optique par méthode passive (PM)
La Scie	819	1286	95,89	0,21	-	854 et 1111
	1286	1602	0,40	0,00	-	-
Magdeleine	1602	1930	1,60	0,00	-	-
Bussac	1930	2248	3,80	0,01	-	-
	2248	2582	0,50	0,00	-	-
Bréziers	2582	2912	6,80	0,02	2709 à 2712	-
	2912	3147	24,00	0,10	3130, 3146	3139, 3144 à 3145
Serres	3147	3382	1,50	0,01	-	-
	3382	3602	1,10	0,01	-	-
Bois du Plan	3602	3842	3,10	0,01	-	-
	3842	4066	0,50	0,00	-	-
Lapeyrouse	4066	4293	0,09	0,00	-	-
	4293	4551	0,20	0,00	-	-
Rochebrune	4551	4862	8,00	0,03	-	4648 à 4649, 4860 à 4862
	4862	5139	0,80	0,00	-	-

Tableau 2 : Débits de fuite mesurés et détection des fuites par fibre optique du 15/11/2011 au 29/12/2011 en rive droite.



Ce barrage poids de type BCR faiblement dosé en ciment ( $82 \text{ kg/m}^3$ ) avec profil élargi en conséquence se compose :

- d'une partie centrale légèrement arquée, supportant l'évacuateur de crue, réalisée entièrement en BCR jusqu'à la cote 534 NGF puis en béton conventionnel vibré (BCV) pour le seuil déversant, le coursier et le saut de ski de l'évacuateur,
- des parties latérales sur chaque rive réalisées entièrement en BCR jusqu'à la crête à la cote 546,5 m NGF (hormis une dalle de fermeture en BCV de 40 cm).
- Hauteur sur fondation : 40,5 m
- Longueur en crête : 140 m
- Fruit des parements :
  - Amont : vertical de la crête jusqu'à la cote 520 NGF puis incliné 1H/1V en dessous.
  - Aval : vertical de la crête jusqu'à la cote 534,25 NGF puis incliné 0,8H/1V en dessous.
- Épaisseur à la base : 58,5 m
- Cote de la R N : 541 NGF
- Cote de la PHE : 545,70 NGF
- Dispositif d'étanchéité :
  - o En fondation : un voile d'injections profond mono-linéaire réalisé depuis la plinthe amont et atteignant environ 30 m de profondeur (forages primaires et secondaires), complété par un traitement de peau par injections de 5 m de profondeur (pour assurer un collage béton-rocher au droit de la plinthe) ;
  - o Pour le barrage : une géomembrane PVC d'épaisseur 2 mm recouvrant le parement amont du fond de la retenue jusqu'au seuil des évacuateurs de crue (à 534 NGF) et jusqu'à la crête en dehors de l'évacuateur.
- Dispositif de drainage :
  - o Drains de fondation verticaux tubés puis crépinés depuis la galerie de drainage, espacement 5 m, profondeur jusqu'à -15 m sous le contact béton/rocher ;
  - o Drains de rive : forés depuis les extrémités de la galerie de drainage : 2 en RD et 2 en RG ;
  - o Drains profonds forés depuis le pied aval du barrage et inclinés à  $40^\circ$  par rapport à l'horizontal vers l'amont, espacés de 50 m : ils sont au nombre de 4. Forés depuis le pied aval en rive, 2 drains en RD et 2 drains en RG ;
  - o Géotextile de  $1\,000 \text{ g/m}^2$  contre le parement amont vertical et collecteurs d'élévation verticaux (demi-diamètre 215 et 300 mm) situés au-dessus de la cote 519,20 NGF, espacés de 3 m, et placés au milieu de chacun des éléments préfabriqués verticaux : au total 44 collecteurs d'élévation.
- Terrain de fondation : Granite à micas noir recoupé par une zone filonienne de zéolites (en RD du Rizzanèse)

### 3.3 Dispositif d'auscultation du barrage

En termes de surveillance de l'ouvrage, le dispositif d'auscultation est assez étoffé. Il comprend notamment :

- Nivellement : 10 repères situés en crête (2 par plots pour les plots centraux et 1 par plot pour les 4 plots latéraux)
- Planimétrie : 10 prismes implantés sur le parement aval à la cote 545,50 NGF, visés depuis 1 pilier unique implanté à l'aval du barrage
- Pendules : 1 pendule direct et 1 pendule inversé situés dans le plot central 4
- Vinchons : 10 vinchons situés aux joints inter-plots dont :
  - o 4 contrôleurs triaxiaux situés dans la galerie de drainage du barrage (519 NGF)
  - o 6 contrôleurs triaxiaux implantés en crête (546,5 NGF)
- Piézomètres : 19 appareils dont :
  - o 9 répartis selon 3 profils : sous les 3 plots évacuateur en RG (plot 3), en partie centrale (plot 4) et en RD (plot 5) avec pour chaque profil, 3 piézomètres équipés de cellules électriques à corde vibrante
  - 2 au contact béton/rocher, inclinés sur l'amont et sur l'aval et
  - 1 vertical profond (-15 m sous le contact béton/rocher) ;

2 forages verticaux très profonds sous le plot 4, équipés de cellules électriques à corde vibrante et réalisés avant la construction du barrage pour suivre localement une zone d'artésianisme potentiel ;

- 4 piézomètres équipés de cellules électriques à corde vibrante situés au contact barrage / rives (2 en RD et 2 en RG) au-dessus de la cote 516 NGF ;
- 4 piézomètres en RD, mis en place pour suivre le niveau de la nappe dans le rocher ;

- Fuites :

- 2 totalisateurs de fuite, collectant séparément, dans la galerie, le drainage d'élévation derrière la géomembrane, dans la partie verticale, dans le caniveau amont, et le drainage de fondation et des rives, dans le caniveau aval ;
- 2 collecteurs du débit du drainage du parement amont, derrière la géomembrane dans la partie inclinée, aux cotes 510 et 515 NGF ;
- 2 captages de venues d'eau collectées en fondation du barrage.

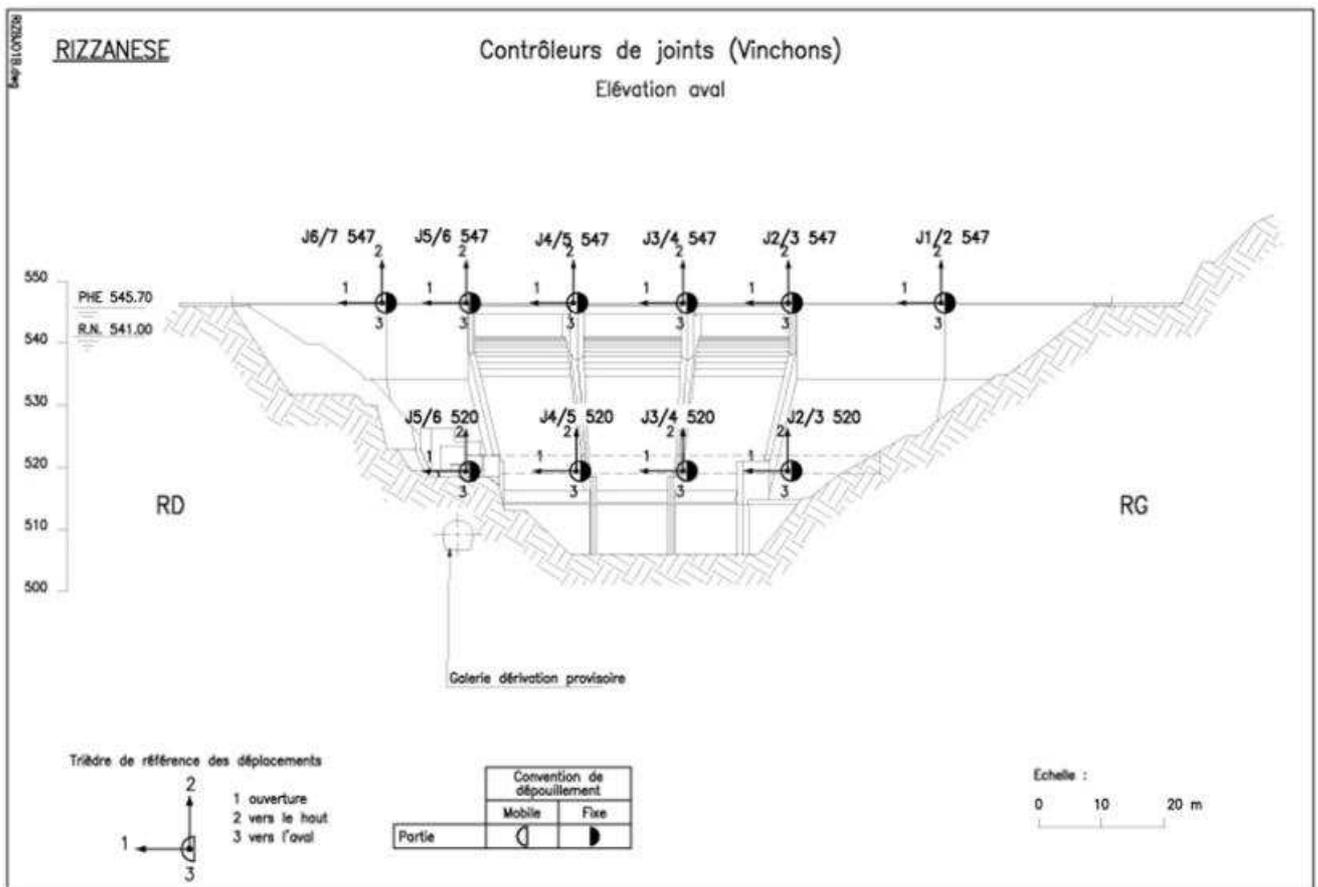


Figure 12 : Implantation des vinchons aux joints inter-plots (4 en galerie et 6 en crête)

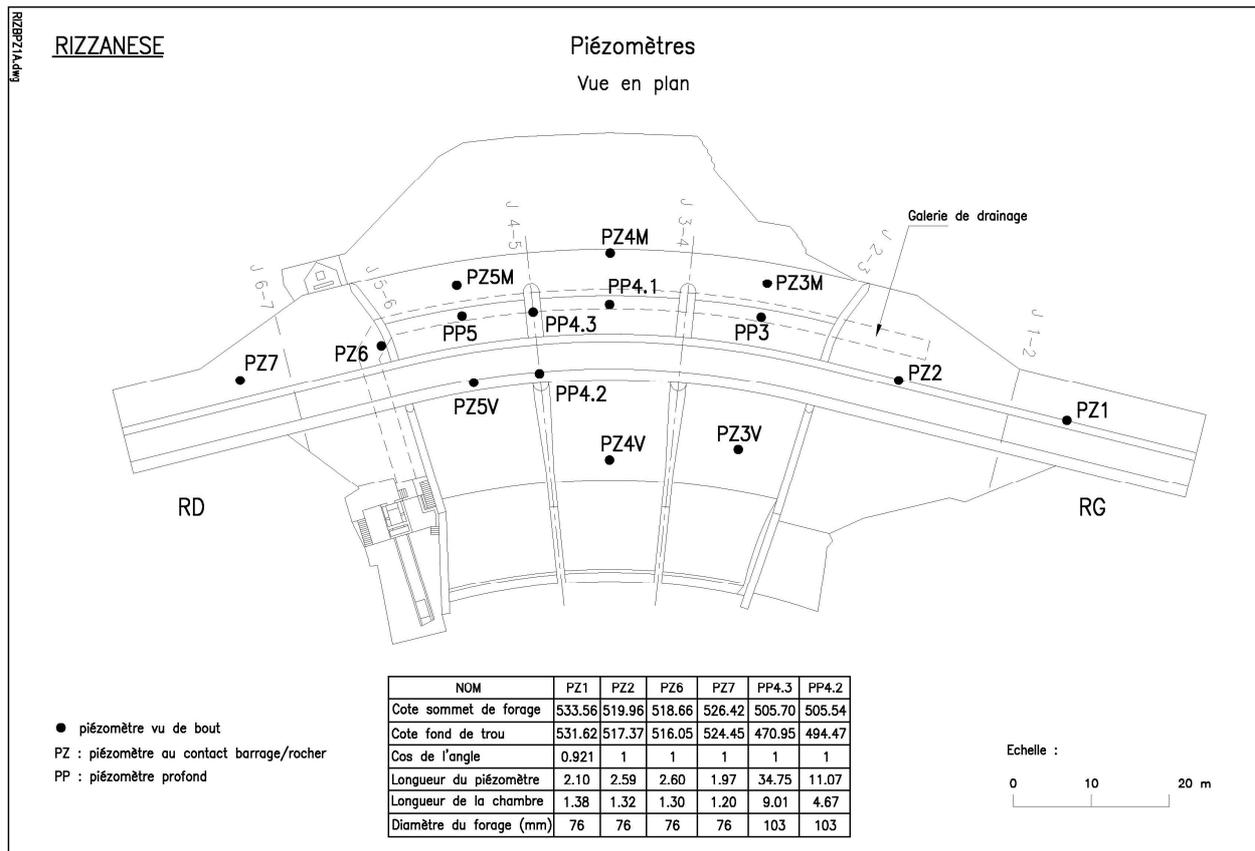


Figure 13 : Implantation des cellules de pression en galerie (au contact béton/rocher et en profondeur)

La majeure partie de l’appareillage d’auscultation disponible (2 pendules, 10 vinchons, 15 piézomètres et 2 canaux de fuite) sera reliée à un automate de télémesure interrogeable à distance depuis l’usine, la DTG ou depuis n’importe quel poste avec accès à l’application. Cette télémesure devrait être mise en service en fin d’année 2012.

A cette liste d’appareillage s’ajoute le suivi par fibre optique, à titre expérimental, de la température et la déformation du BCR au sein de l’ouvrage au cours de sa construction et de sa mise en eau. La fibre optique se trouve installée au cœur du barrage aux cotes approximatives de 523 et 531 NGF (voir § 4).

La pertinence du dispositif d’auscultation sera réexaminée à l’issue de la mise en eau de l’ouvrage. Cette réflexion permettra d’élaborer la première Consigne de Surveillance et d’Auscultation (CSA) en caractérisant notamment les dispositifs principal et secondaire ainsi que la fréquence d’interrogation des différents instruments.

### 3.4 Procédure de mise en eau et organisation

La procédure de mise en eau prévoit la réalisation de 2 paliers techniques permettant de valider le bon comportement du barrage : le premier palier est prévu à la cote théorique 532 NGF, d’une durée d’une semaine, correspondant approximativement à 50 % de la poussée hydrostatique supportée par l’ouvrage à RN, le second palier à RN (541 NGF), durant 3 semaines. Le premier palier a finalement été réalisé à la cote 529,2 NGF (45 % de la poussée), pour des problèmes de fuites à travers la membrane, qu’il a fallu réparer.

Pour garantir la sûreté des installations, la surveillance et des mesures d’auscultation sont réalisées, en mode normal, tous les jours par l’Aménagement, avec une surveillance 24h /24 (3 x 8 h). Des Procédures d’Exécution d’Essais (PEE), répondant aux directives de la circulaire du 8 juillet 2008, définissent notamment les moyens mis en place pour maîtriser le remplissage de la retenue ainsi que le programme de surveillance prévu aux différents paliers et, le cas échéant, les modalités d’auscultation renforcée.

Ce dernier aspect peut intervenir en cas d'observation d'une anomalie lors de l'Inspection Visuelle journalière ou en cas de détection d'un écart défini à travers les Critères Techniques d'Action (CTA) par rapport aux mesures d'auscultation. Des seuils d'alerte, déterminés par le CIH, renvoient à la conception même de la structure et à la garantie de sa stabilité lors du remplissage de la retenue (pour les niveaux piézométriques, les déplacements maxi et les niveaux de fuites admissibles).

Les mesures d'auscultation, saisies sur site par les équipes de surveillance avec un terminal de saisie portable, se déversent ensuite sur le nouveau logiciel de gestion et d'analyse des mesures d'auscultation, KOALA, géré par DTG. En cas de dépassement d'un ou plusieurs CTA tels que définis dans les PEE, une réunion de concertation immédiate est mise en place pour décider de la suite du programme (avec à minima le Chef d'Aménagement, le responsable de la mise en eau et le chargé d'exploitation).

### **3.5 Comportement du barrage jusqu'à la fin du premier palier technique**

#### *3.5.1 Problème de venues d'eau au travers de la membrane*

La mise en eau a débuté le 23/05/12 à 10 h. Elle a rapidement été marquée par le dépassement des CTA sur les débits collectés avec l'apparition d'importantes venues d'eau via le dispositif de drainage d'élévation (à partir de la cote 525,5 NGF). A la cote 526 NGF, 4 venues d'eau (drains DE 5.1, DE 3.1, DPT4.1 et DE 3.5 voir Figure 16) s'étaient déclenchées avec un débit maximum d'environ 380 l/min le 25/05/12 en milieu de journée.

La décision d'abaisser le plan d'eau a alors été prise afin localiser les niveaux des défauts. Le 28/05/12, à la cote 521.9 NGF, les débits étaient pratiquement nuls ce qui a permis de localiser les niveaux d'apparition détectés. Ces venues d'eau étant imputables à des défauts d'étanchéité de la membrane amont sans risque pour la sûreté de l'ouvrage, puisque parfaitement collectées par le réseau de drainage, la reprise du remplissage a été actée.

Au fur et à mesure de cette phase de remontée, de nouveaux collecteurs verticaux du drainage se sont déclenchés pour atteindre un débit total sur le réseau des collecteurs verticaux de l'ordre de 1 600 l/min le 03/06/12 pour une cote de 529,5 NGF. Les nombreuses apparitions de venues d'eau sur les derniers mètres de remplissage ont alors conduit à proposer la réalisation du palier technique à la cote 529,2 NGF (contre 532 NGF envisagé dans le programme de mise en eau), soit à 45 % de la charge hydraulique totale.

Les différentes investigations (observations du parement amont par plongeurs, traçage à la fluorescéine, contrôles caméra dans les drains, etc.) menées conjointement avec le groupement d'Entreprises ont permis de préciser le diagnostic, concluant à un défaut générique. On notera que des demi-buses verticales étaient facilement inspectables depuis la crête pour les rives et plus difficilement depuis leur débouché en galerie pour les demi-buses sous l'évacuateur, à cause des coudes. Sous la pression de l'eau, la géomembrane solidaire des panneaux préfabriqués se détache de ceux-ci et se déforme dans l'espace vide des demi-buses des collecteurs verticaux qui sont plaqués contre la membrane (zones où la membrane n'a pas d'assise). Dans un tiers des collecteurs sollicités par le niveau atteint par la retenue, cette déformation s'est accompagnée d'ouvertures de la géomembrane au niveau des soudures horizontales entre panneaux, libérant des débits significatifs dans les collecteurs verticaux du drainage.

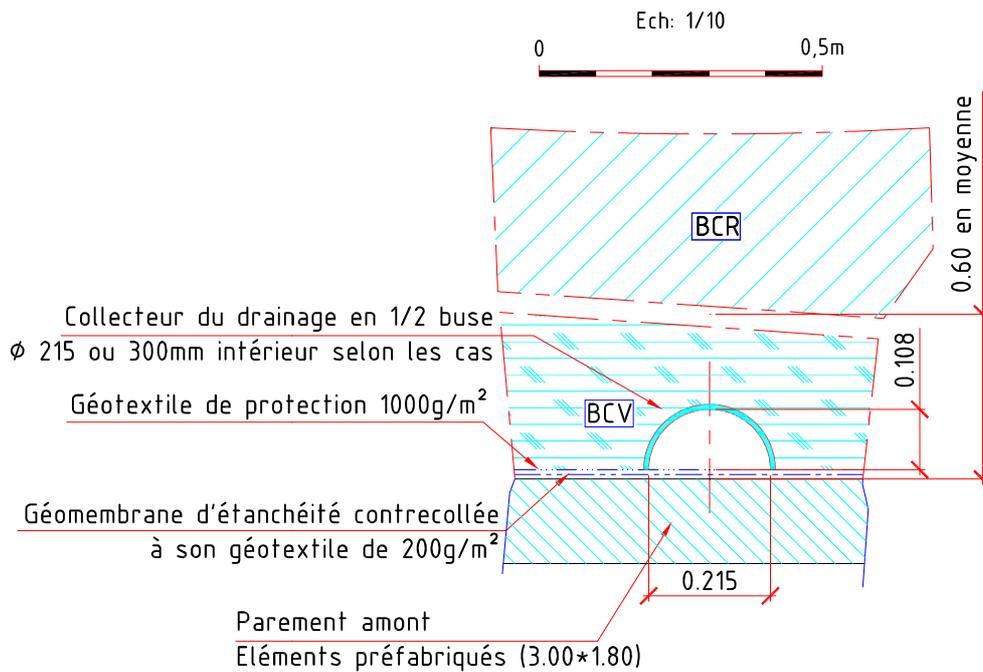


Figure 14 : Coupe verticale demi-buse plaquée sur la géomembrane



Figure 15 : géomembrane et géotextile gonflés par la pression, avec fuite localisée.

Lors du palier technique à 529 NGF (du 04 au 11/06/12) des interventions de calfatage par l'amont des zones d'entrée d'eau ont permis de réduire le niveau global des venues d'eau pour les porter aux alentours des 400 l/min. Le 21/06/12, un diagnostic complet des désordres et des propositions de traitement de ces défauts ont été présentés au Service du Contrôle. Ces travaux avec baisse temporaire du niveau de la retenue devraient être réalisés en juillet et la mise en eau devrait pouvoir reprendre son cours normal début août 2012.

Malgré ces venues d’eau significatives, l’intégrité de l’ouvrage n’a pas été remise en cause (l’ouvrage étant dimensionné pour supporter, sans problème, des sous pressions sans tenir compte du drainage mis en place) et les venues d’eau quoique spectaculaires ont été parfaitement collectées par le système de drainage et n’ont circulé que très faiblement dans le BCR. Toutefois, ces venues d’eau ont nécessité l’adaptation du dispositif d’auscultation (modification du point de mesure de fuite totalisateur du drainage d’élévation permettant de mesurer un débit jusqu’à 1 650 l/min contre 420 l/min initialement installé) ainsi que l’utilisation de capacités de contenances pour les mesures instantanées individuelles de chaque collecteur conjuguées à une surveillance renforcée du dispositif (mesures infra-journalière au lieu de journalières ou hebdomadaire). Ces adaptations ont garanti le maintien d’un suivi efficace de l’ouvrage avec une bonne maîtrise des risques.

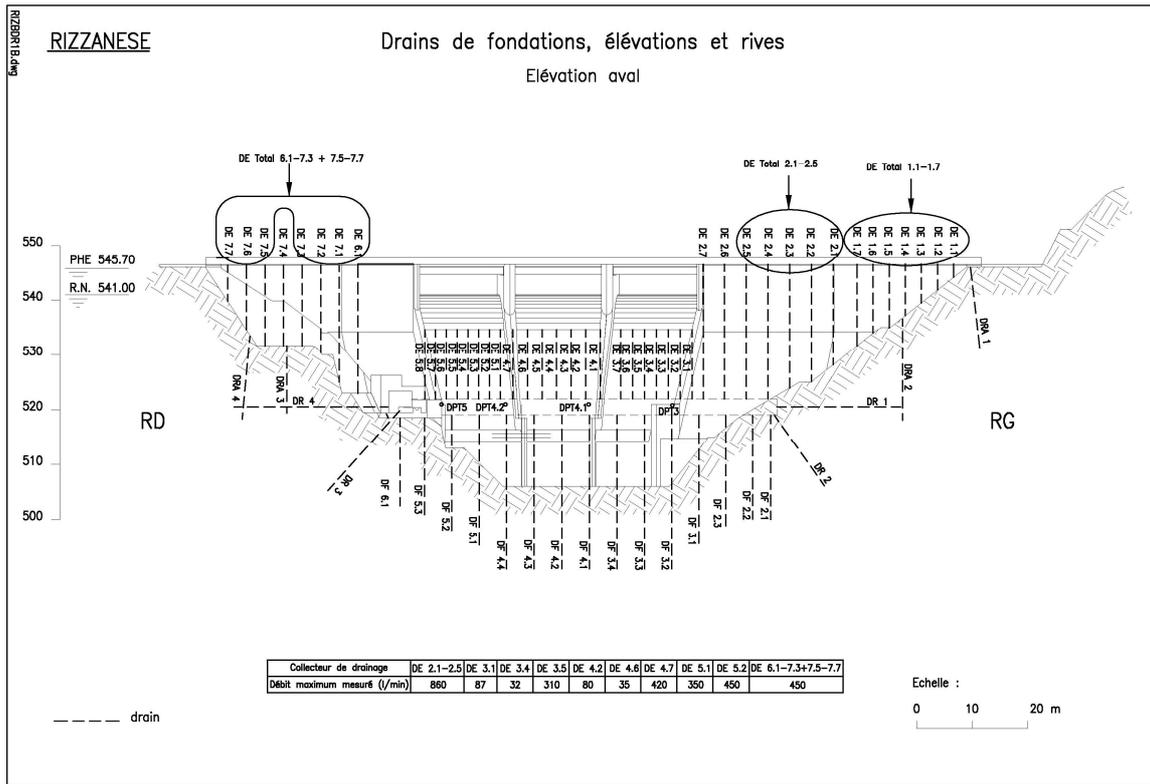


Figure 16 : Localisation des venues d’eau et des débits maximums mesurés (en l/min)

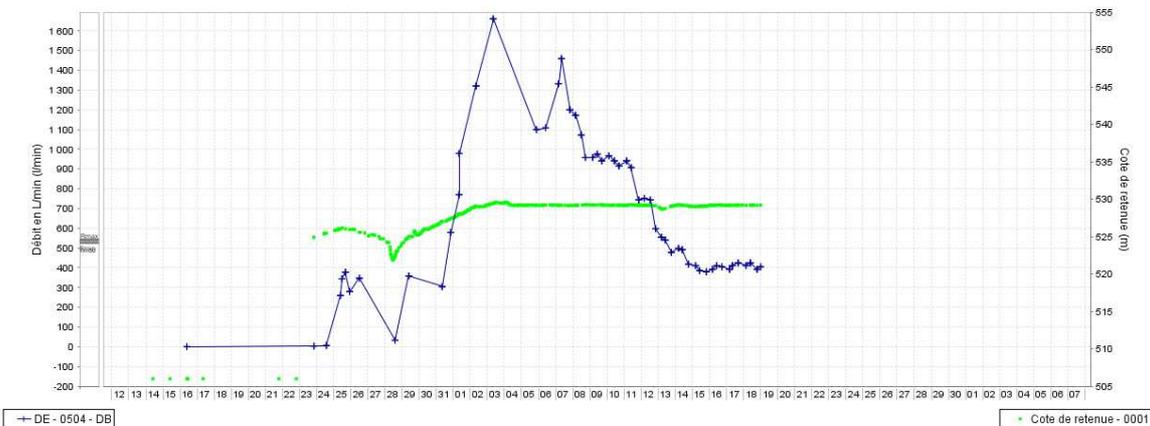


Figure 17 : Evolution du débit global de drainage et de la cote de retenue

### 3.5.2 Pour le reste un comportement satisfaisant

#### **Le comportement mécanique**

Depuis la mesure origine en avril 2012 et jusqu'au palier vers la cote 529,2 NGF, le comportement mécanique de l'ouvrage a été caractérisé en crête par des déplacements généralement faibles ou très localisés.

Les déplacements verticaux observés font état d'un léger exhaussement de la crête du barrage, probablement en lien avec le réchauffement du béton voire à la sous-pression.

Dans le plan horizontal, les déplacements amont-aval en crête ne sont pas significatifs. Dans la direction RD-RG les mouvements entre plots sont restés modiques, excepté entre les deux demi-piles de part et d'autre du plot 4 où l'on a observé une ouverture pouvant atteindre par moment 8 mm. Ces déplacements observés sur cette partie de la structure de moindre inertie (hauteur entre 6 et 12 m pour une épaisseur de 1 m) et encore en phase chantier (pont en fin de construction), ne sont pas de nature à générer de désordres sur l'ouvrage. Ils s'expliquent en partie par l'effet thermique : une face de la demi-pile est exposée au soleil, l'autre face se trouvant au niveau du joint entre deux demi-piles reste toujours à l'ombre.

L'ensemble des dispositifs mécaniques en galerie montrent une quasi absence de mouvement de la partie basse du barrage. La stabilité du pied de l'ouvrage a ainsi été vérifiée.

En conclusion, les déplacements faibles en crête ou très localisés et sans incidence sur la structure, ainsi que la stabilité du pied de l'ouvrage par rapport à sa fondation, ont permis de juger le comportement mécanique de l'ouvrage comme satisfaisant.

#### **Le comportement hydraulique**

En dehors du problème des venues d'eau exposé ci-dessus, le comportement hydraulique de l'ouvrage jusqu'à la fin du premier palier technique a été jugé satisfaisant :

- En effet, les drains de fondations courts forés depuis la galerie de drainage ne débitent pas (pour une cote de retenue à 529.2 NGF les niveaux piézométriques sont établis sous la cote de l'exutoire des drains), tandis que les drains de rives, aval et sous-barrage, fournissent des débits faibles à modérés n'amenant pas de remarque particulière.
- Concernant la piézométrie sous le barrage, on observe un faible gradient entre l'amont et l'aval (en lien avec une perméabilité de fissure avec une frange supérieure relativement perméable, qui évacue les débits sans mise en charge) avec des niveaux piézométriques qui s'établissent entre 510 et 514 NGF. Seul un piézomètre s'établit à un niveau supérieur à celui du CTA à 529 NGF (sur la base d'un profil de sous pression triangulaire) mais sans être alarmant car en communication avec un drain de fondation situé à proximité et avec un nouveau piézométrique amont (sur le même profil) très bas. En moyenne le rabattement de la piézométrie a été satisfaisant avec une diminution de l'ordre de 75 % par rapport à la charge hydrostatique amont.

### **3.6 Conclusion**

Le dispositif manuel d'auscultation étoffé, mis en place pour le suivi de la mise en eau du Rizzanèse et pour son exploitation future, a bien rempli son rôle. Les instruments de mesure ont parfois dû être adaptés (point de fuite totalisateur redimensionné et mise en œuvre de capacités de grande contenance pour des mesures individuelles de forts débits) pour prendre en compte les débits collectés par le réseau de drainage plus importants que prévu, en lien avec des défauts du dispositif d'étanchéité amont (géomembrane).

La mise en place conjointe d'une surveillance renforcée (mesures infra-journalière par des équipes en 3 x 8) a permis un suivi continu efficace. Celui-ci aurait néanmoins pu être facilité par la mise en service de la télémessure (qui est prévue en fin d'année 2012) qui permettra des interrogations rapprochées des capteurs qui y sont reliés.

Le comportement de l'étanchéité du parement amont vertical par géomembrane n'a pas été jugé satisfaisant, même s'il n'affecte pas la sécurité de l'ouvrage, et il a été décidé d'engager une réparation avant la poursuite de la montée du plan d'eau au-delà de la cote du palier à 529 NGF. En dehors de ce désordre, le comportement général de l'ouvrage a été jugé satisfaisant.

Les problèmes rencontrés ont montré une fois de plus l'importance d'une surveillance renforcée lors des opérations de première mise en eau d'un ouvrage neuf.

#### 4. MISE EN ŒUVRE DE FIBRES OPTIQUES DANS LE BARRAGE DU RIZZANESE

A l’occasion de la construction du barrage de Rizzanèse, il a été décidé, à titre expérimental, la mise en place de fibres optiques. Cette mise en œuvre constitue une première pour les ouvrages en béton du parc hydraulique d’EDF.

Deux types de fibres ont été disposés dans le béton : des fibres de mesure de déformation et des fibres de mesures de température.

Aux niveaux 523,3 et 531,4 ont ainsi été installées :

- une fibre de température présentant un tracé “en créneau” permettant de répartir les mesures sur l’ensemble de la surface (Figure 18),
- une fibre de déformation placée sur l’axe de l’ouvrage avec un créneau en rive gauche afin d’évaluer d’éventuels gradients de déformation entre l’amont et l’aval (Figure 19).

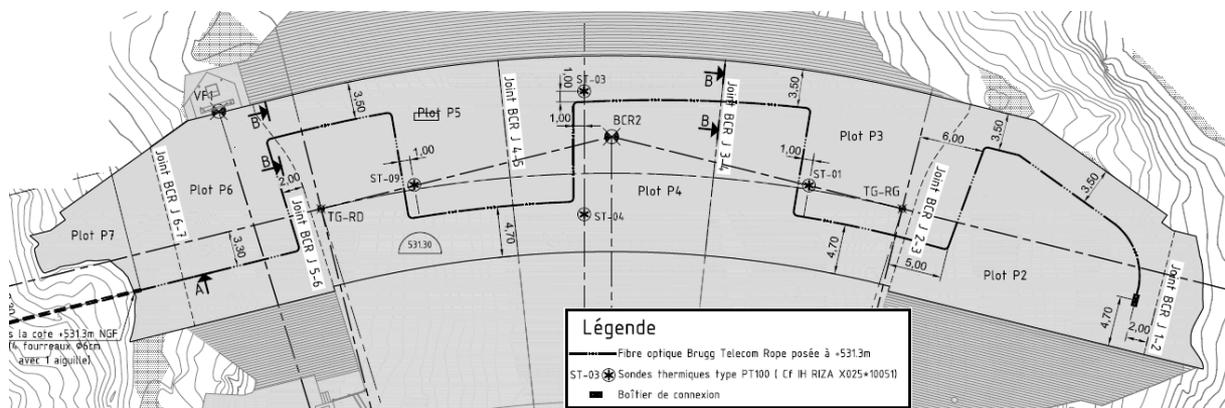


Figure 18 : Fibre de température à la cote 531,40

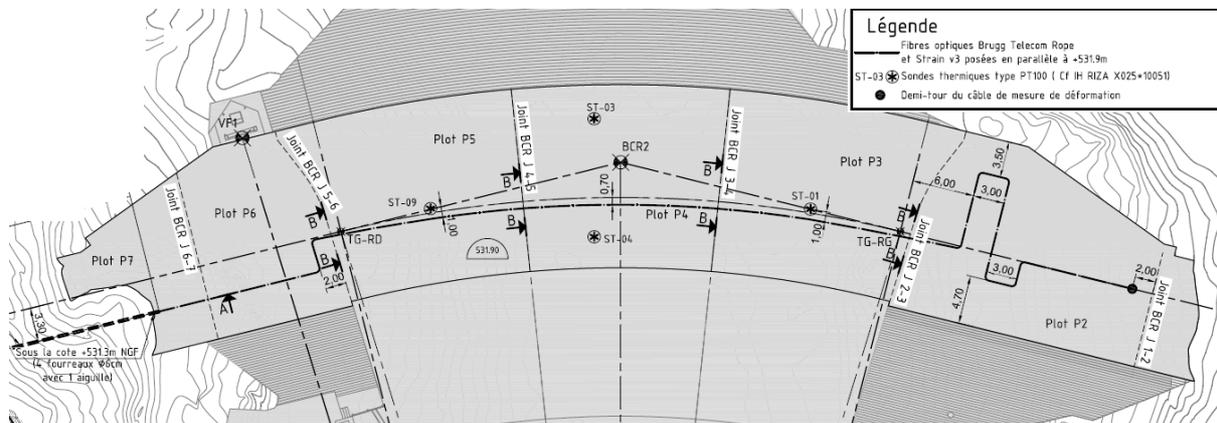
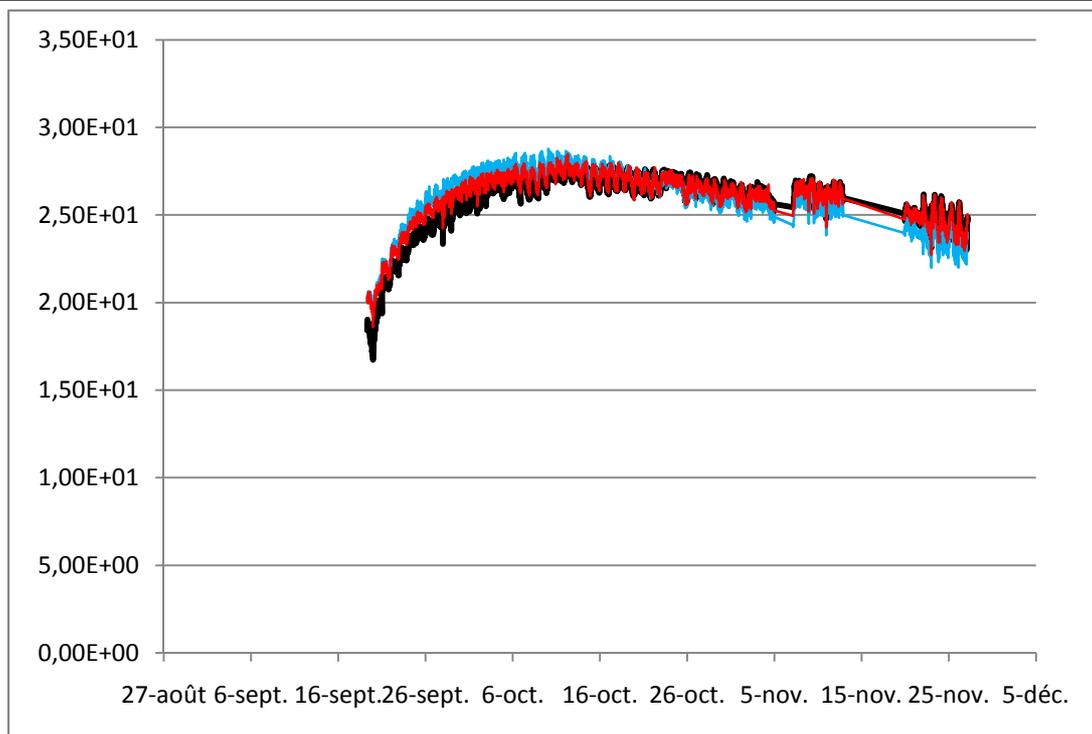


Figure 19 : Fibre de déformation et température associées à la cote 531,40

S’agissant d’un dispositif prototype, différentes difficultés ont dû être surmontées pour intégrer un tel dispositif dans un chantier en cours. Différentes interruptions de mesures, suite à des coupures prolongées d’alimentation électrique ou à des contraintes de raccordement, ont été observées.

Des mesures intéressantes ont dès à présent pu être collectées dès la phase de construction de l’ouvrage ; ces mesures sont présentées en Figure 20.



**Figure 20** : Mesures de température à 531,30 au cours de l'année 2011 (en noir : mesure amont (151 m), en rouge : mesure au centre (155 m), en bleu : mesure aval (159 m))

Le graphique comporte trois mesures obtenues sur un des créneaux de rive droite, à l'amont, au centre et à l'aval. On note une très bonne homogénéité des mesures. La phase d'exothermie des bétons est parfaitement identifiable avec une élévation de température bien corrélée avec l'exothermie des liants.

D'ores et déjà ce dispositif apparaît donc opérationnel et va pouvoir être utilisé au cours des opérations de mise en eau.

## REMERCIEMENTS

Merci à tous les acteurs ayant travaillé sur les projets de Curbans et de Rizzanèse pour leur contribution dans l'élaboration de cette communication collective.