Confortement parasismique du barrage de Chancy-Pougny

Seism reinforcement of Chancy-Pougny dam

Mathieu Ferriere
Compagnie Nationale du Rhône – 2 rue André Bonin – 69 316 Lyon Cedex 04
m.ferriere@cnr.tm.fr

Jean-Pierre Person, Laurent Thareau,
Compagnie Nationale du Rhône – 2 rue André Bonin – 69 316 Lyon Cedex 04
j.person@cnr.tm.fr, l.thareau@cnr.tm.fr

Téléphone : +33 (0) 472 006 969, Fax : +33 (0) 472 106 653

MOTS CLÉS

Aménagement hydroélectrique de basse chute au fil de l'eau, barrage mobile, séisme de vérification, modèle géologique et mécanique, non linéaire, injections, butons en béton, tirants actifs et passifs.

RÉSUMÉ

Le barrage de Chancy-Pougny fait partie d'un aménagement hydroélectrique de basse chute au fil de l'eau, situé sur le Rhône franco-suisse à une vingtaine de kilomètres en aval de Genève. C'est un barrage binational qui est exploité par la Société des Forces Motrices de Chancy-Pougny (SFMCP). Il est de type barrage mobile en maçonnerie et béton armé datant de 1925. Dans le cadre du renouvellement de sa concession, la SFMCP doit mener à terme d'ici 2 à 3 ans le projet de rénovation et de confortement du barrage dont le comportement sous sollicitations sismiques a dû être examiné au regard des recommandations de l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) qui prescrit un séisme d'évaluation de sécurité de période de retour de 5 000 ans [1].
Dans un premier temps, l'ouvrage a été analysé par la méthode du spectre de réponse et sa stabilité évaluée sur la base d'une valeur unique de l'angle de frottement du sol de fondation. Les confortements parasismiques qui en résultaient étaient conséquents et à la limite de la faisabilité technique. Les reconnaissances complémentaires menées en 2011 et une approche plus élaborée basée sur les déplacements ont permis d'aboutir à un projet définitif présenté fin 2012 aux autorités de tutelles suisse et française. L'article se concentrera sur la progression des études et des reconnaissances afin de montrer comment ont été résolus les problèmes rencontrés. Les mesures définitives retenues pour le confortement seront détaillées.

ABSTRACT

The Chancy-Pougny hydropower development scheme is a low-head run-of-the-river hydropower plant, located on the French-Swiss Rhone, 20 km downstream of Genève. It is a bi-national dam exploited by the Société des Forces Motrices of Chancy-Pougny (SFMCP). It is a gate structure dam built of masonry and reinforced concrete dating from 1925. In the framework of renewing the concession, the SFMCP have to to carry out a study on the dynamic behavior of the dam under seismic shock with a return period of 5000 year ,requested by the swiss supervisory authorities (OFEN [1].
In a first time, the dam was analysed with the response spectrum method and his stability estimated with a single value of friction angle of the marl. The earthquake-resistant rehabilitation which resulted from it was consequent and on the technical feasibility limit. The complementary drilling and test campaign led in 2011 and a more elaborate approach based on the displacements method permitted to succeeed in a definitive project presented at the end of 2012 in Swiss and French authorities. The article focuses on describing the progression of the studies to show how were resolved the met problems . It presents the project finally chosen to reinforce the structure.

1. INTRODUCTION

1.1 Description de l'aménagement

L'aménagement hydroélectrique de Chancy-Pougny est du type des aménagements dits de "basse chute au fil de l'eau", où la chute est créée par un barrage mobile traversant tout le lit du fleuve et où l'usine est établie en prolongement du barrage. A Chancy-Pougny, l'aménagement comporte quatre principaux ouvrages qui sont de la rive gauche (côté Suisse) vers la rive droite (coté France) :

- L'usine hydroélectrique de 55 MW de puissance installée (4 turbines Kaplan de 12 MW et 1 turbine Francis de 7 MW) après rénovation des groupes,
- le barrage (classe B selon la réglementation française – 10,00 m de chute),
- l'amorce écluse (seule la tête amont a été construite, fermée par un batardeau en béton provisoire),
- le poste électrique implanté sur la plate-forme au sommet du grand talus rive droite.

1.2 Description du barrage

A partir des fondations, le barrage est divisé en deux parties, appelées "basses" et "hautes". Les parties basses forment le barrage proprement dit et comprennent les piliers, le seuil et les vannes levantes de type Stoney qui viennent fermer les 4 passes du barrage. Les parties hautes servent à l'exploitation et sont constituées par les piles et le pont supérieur.

Le pont supérieur s'apparente à un pont en béton armé d'une longueur d'un peu plus de 100 m. Il est constitué de cinq travées de 15 à 31 m de portée en appui simple sur cinq piles en béton, une culée en rive droite et une tour des câbles en rive gauche.

Les piles font 12 m de hauteur et sont fondées sur la face supérieure des piliers des parties basses du barrage. La culée en rive droite est fondée sur un talus en moraine, et la tour des câbles, de 26 m de hauteur, repose sur l'aile rive gauche du barrage qui est aussi l'aile rive droite du l'usine hydroélectrique (voir figure 1)

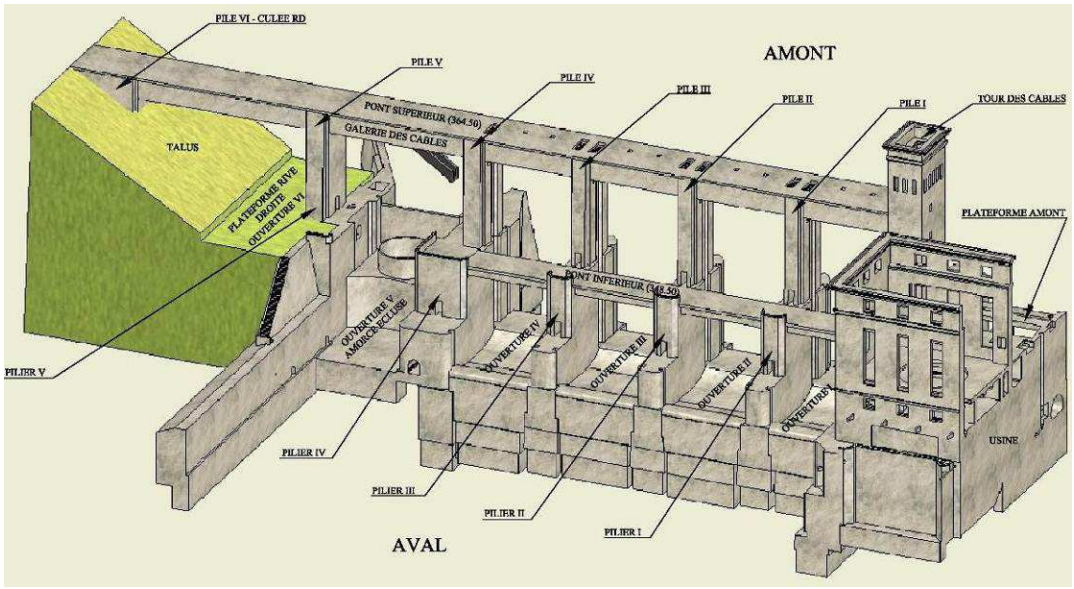

***Figure 1** : Barrage de Chancy-Pougny – Vue 3D*

Le tablier du pont supérieur et la tour présentent des sections creuses en béton qui contiennent les câbles électriques en provenance de l'usine et à destination du poste de transformation électrique situé au sommet du talus en rive droite. Les installations de levage des vannes sont fixées sur le tablier du pont supérieur. Par ailleurs, le tablier constitue la voie de roulement d'une grue mobile imposante, utilisée pour mettre en place les batardeaux.

Les piliers sont fondés sur des caissons de fonçage qui reposent sur le substratum molassique. Des radiers intermédiaires de 4 m d'épaisseur protègent le barrage contre l'érosion hydraulique entre les piliers.

2. DÉROULEMENT DES ÉTUDES

2.1 Analyse historique de la construction

La lecture du compte rendu des travaux et les prises de vue datant de la construction ont permis de déterminer la procédure de construction des piliers.

La technique utilisée a été celle des fondations sur caissons perdus, foncés à l'air comprimé. Au-dessus des caissons, un mur préliminaire en granit d'environ 1,50 m de hauteur était réalisé par phases successives sur le pourtour du pilier. Dans l'enceinte en maçonnerie ainsi créée, des couches successives de béton damé étaient coulées. Lorsque le mur périphérique atteignait une hauteur suffisante, le caisson, ainsi chargé par la maçonnerie, était descendu dans l'eau à l'aide de tirants de suspension.

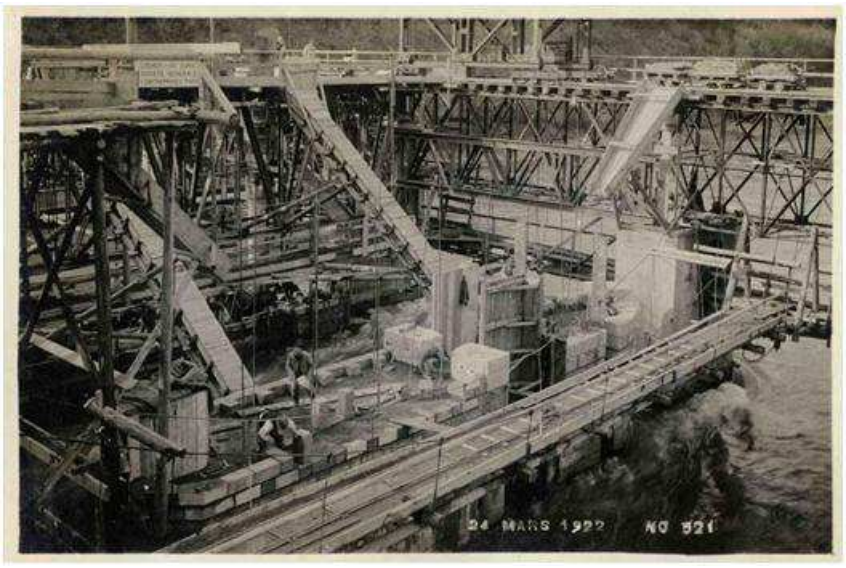

***Figure 2** : Barrage de Chancy-Pougny – construction du pilier 2 en 1922*

2.3 Campagne de forages et d'essais 2011

Les études de stabilité antérieures (2006) reposaient sur une valeur unique de l'angle de frottement de la marne prise à 27° à 25,2 m de profondeur. Cette valeur correspondait à un point de mesure en laboratoire et non pas à la valeur associée à la contrainte effective sous l'ouvrage. Il en découlait des résultats pessimistes comme l'ont démontrés par la suite les essais dilatométriques et les essais en laboratoire de cisaillement sur les interfaces entre couches rocheuses.

Il a donc été décidé de compléter la documentation existante par des forages focalisés sur les secteurs les plus défavorables pour la stabilité du barrage, soient les piliers 1, 2 et 3 (la figure 3 donne leur implantation). Ils ont permis de localiser les zones de faiblesses dans les bétons et observer la nature et la qualité du rocher sur environ 30 m de profondeur.

Des scans optiques ont été réalisés dans ces forages ainsi que des essais d'eau de type Lugeon et des essais dilatométriques. Les forages placés dans l'axe longitudinal du barrage ont été équipés de dispositifs d'auscultation (sondes de pression) afin de surveiller les conditions de sous-pressions sous l'assise des piliers. Des essais en laboratoire (18 essais de compression uniaxiale et 16 essais de cisaillement direct) ont été effectués afin de tirer un modèle conceptuel des caractéristiques du massif rocheux de la fondation du barrage.

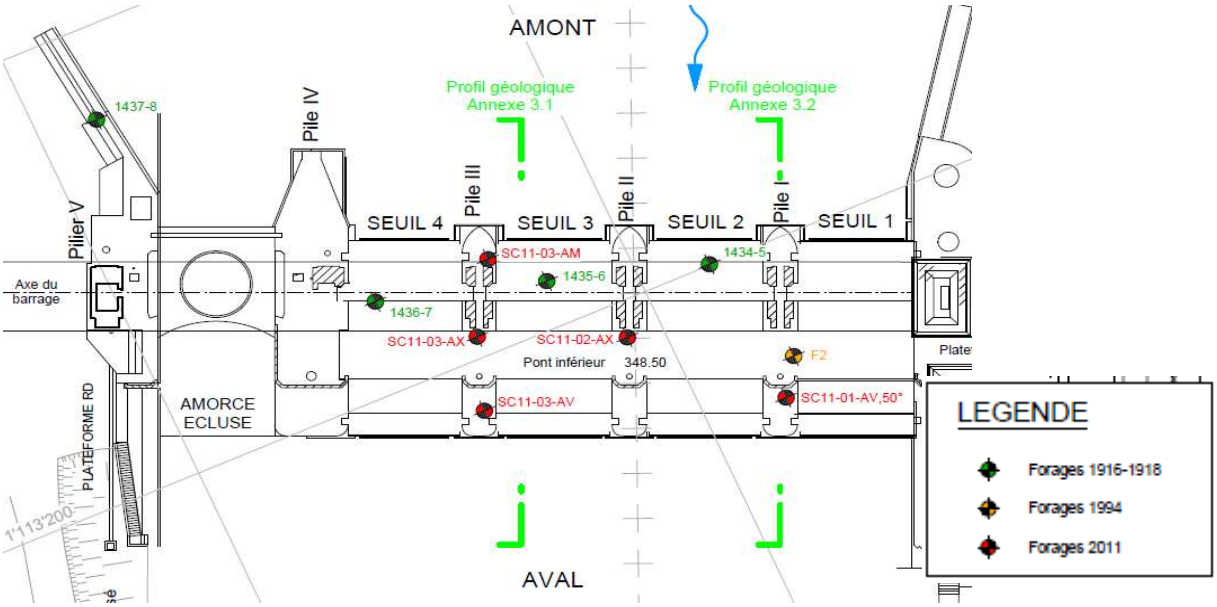

***Figure 3** : Barrage de Chancy-Pougny – Implantation des sondages de reconnaissances*

2.4 Résultats des sondages dans les bétons

La méthodologie de construction laissait à penser que le béton réalisé en 1920 présenterait un matériau très hétérogène car son malaxage, son coulage et son compactage de l'époque peuvent être considérés comme défaillants selon les critères actuels. La surface du béton n'était probablement pas nettoyée avant les phases de bétonnage suivantes (ni les granulats du site avant malaxage d'ailleurs).

Ces craintes ont été confirmées par les sondages de 2011 qui ont révélé des zones importantes de pur gravier, allant jusqu'à 0,5 m, sans aucune présence de granulats fins ou de ciment. Au niveau du couvercle des caissons, il a même été constaté des cavités allant jusqu'à 0,3 m de hauteur comme le montrent ci-après les scans optiques réalisés dans les forages (figure 4).

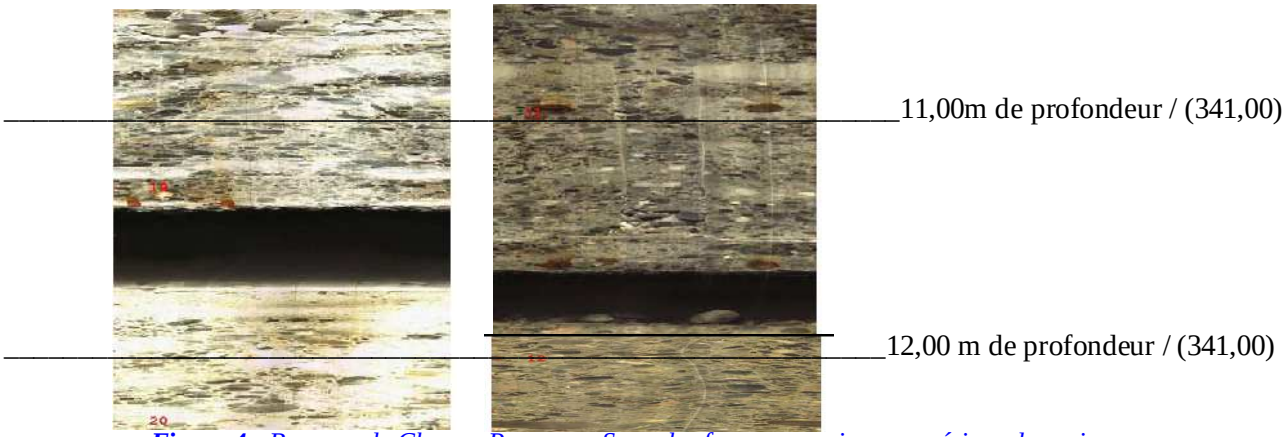

***Figure 4** : Barrage de Chancy-Pougny – Scan des forages au niveau supérieur des caissons*

2.5 Modèle géologique et mécanique de la fondation

2.5.1 Modèle géologique [2]

Un modèle numérique 3D a été réalisé à l'aide du logiciel GMS.0 en introduisant la totalité des informations de l'ensemble des forages et en construisant plusieurs profils en reliant entre elles les couches de même nature. Ces profils ont ensuite été affinés en visualisant le modèle sous différents angle et en rendant les couches cohérentes de manière à obtenir un résultat jugé représentatif des conditions in situ. Le modèle 3D confirme le modèle simplifié en 4 couches sur l'ensemble du site qui a été utilisé dans la suite des études.

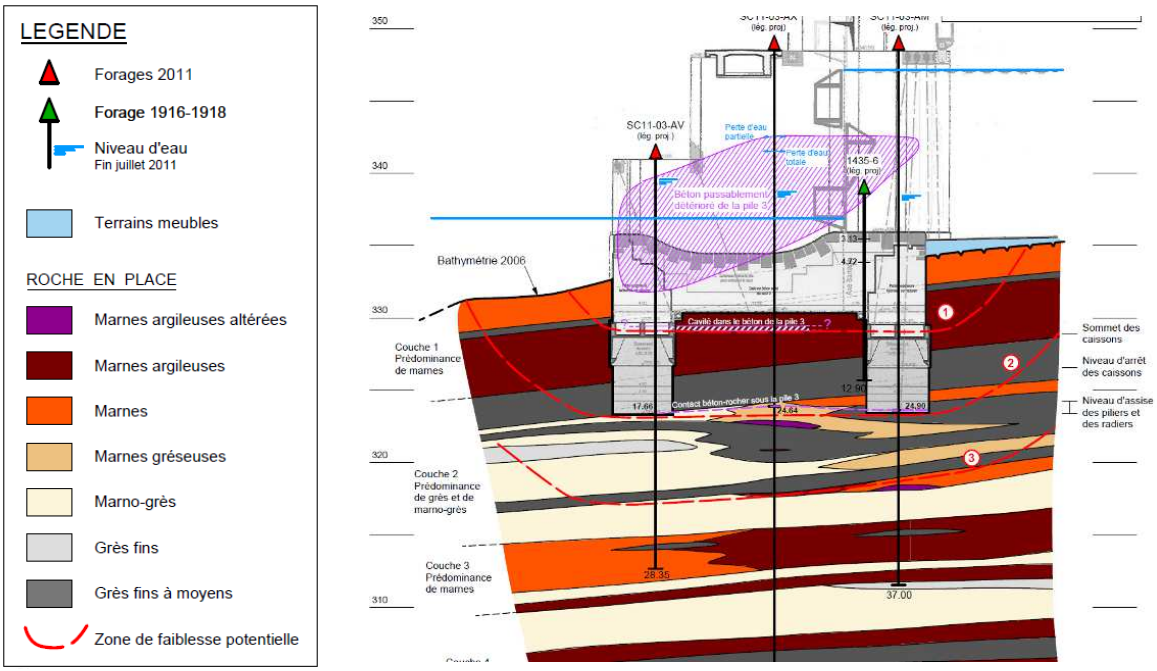

***Figure 5** : Barrage de Chancy-Pougny – Modèle géologique de la fondation*

2.5.2 Modèle mécanique [2]

Sur la base du modèle géologique, un modèle géométrique et mécanique de la fondation a été construit afin de définir un cadre de représentation des propriétés de résistance et de déformation de la fondation. Cette représentation a été utilisée pour évaluer le mieux possible le comportement de la masse rocheuse et sa sécurité vis-à-vis du poinçonnement, du renversement et du glissement. La démarche a été la suivante :

- Etape 1 : les essais en laboratoire ont permis de déterminer les valeurs moyennes de résistance à la compression simple (σ_C) et du module d'élasticité (E – ou module de Young) pour chaque type de formation à "l'échelle de l'échantillon".

Roche	Echantillon	ρ [tm^{-3}]	Compression simple		Valeurs moyennes			
			σ_c [MPa]	E [MPa]	Nbre d'essais	ρ [tm^{-3}]	σ_c [MPa]	E [MPa]
Marnes argileuses	SC11-03-AM-34.3-C	2.46	3.6	150	5	2.49	4.8	408
Marnes argileuses	SC11-03-AM-34.9-C	2.51	7.3	450				
Marnes argileuses	SC11-03-AM-36.1-C	2.51	5.5	350				
Marnes argileuses	SC11-01-AV-43.7-C	2.47	3.3	550				
Marnes argileuses	SC11-01-AV-50.1-C	2.51	4.3	540				
Marnes	SC11-02-AX-45.5-C	2.57	4.4	275	1	2.57	4.4	275
Marnes gréseuses	SC11-03-AX-24.7-C	2.55	12.8	850	1	2.55	12.8	850
Marno-grès	SC11-03-AX-37.8-C	2.55	17.4	1800	4	2.54	16.0	1'675
Marno-grès	SC11-03-AX-39.4-C	2.49	13.3	1900				
Marno-grès	SC11-03-AV-20.7-C	2.55	14.7	1400				
Marno-grès	SC11-03-AV-24.5-C	2.55	18.7	1600				
Grès fins	SC11-02-AX-26.3-C	2.57	40.8	3800	4	2.56	30.3	3'575
Grès fins	SC11-03-AX-28.2-C	2.53	32.4	3400				
Grès fins	SC11-03-AM-27.4-C	2.58	32.2	4600				
Grès fins	SC11-03-AV-19.5-C	2.55	15.6	2500				
Grès fins à moyens	SC11-02-AX-45.7-C	2.54	12.4	1500	3	2.51	19.5	3'133
Grès fins à moyens	SC11-03-AM-28.6-C	2.5	22.2	2900				
Grès fins à moyens	SC11-03-AV-23.5-C	2.5	24	5000				

***Tableau 1** : Barrage de Chancy-Pougny – Résultats des essais de compression simple*

- Etape 2 : les essais dilatométriques réalisés in situ, combinées avec la méthode de Hoek & Brown, qui consiste à minorer les valeurs "à l'échelle de l'échantillon" en fonction de la fracturation du massif rocheux, ont permis d'apprécier les propriétés des formations à l'échelle du massif rocheux. Il est à noter que la résistance à la rupture a été estimée dans la plage de contraintes effectives s'exerçant sous le barrage (200 à 400 kPa). Cette démarche conduit à un angle de frottement plus élevé que les 27° des

études antérieures et, à une cohésion limitée en raison de la forme parabolique de l'enveloppe (on considère la tangente à l'enveloppe de rupture dans la plage de contraintes effectives).

Rocher	ESSAIS		Classification de Hoek & Brown				Caractéristiques du massif rocheux selon l'approche de Hoek & Brown			ESSAIS
	σ_c (valeur moy. ± 1 écart-type)	Module de Young, E	GSI	mi	D		Résistance à la rupture selon Mohr-Coulomb pour σ_3 = 0.2 - 0.4 MPa		Module de déformation	Module de déformation
							ϕ	c		
	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]		[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Marnes argileuses	3 - 7	400 - (800)	80 - 95	5 - 8	0	→	37 - 49	0.2 - 1.0	350 - 800	-
Marnes	(4 - 10)	(600 - 1'500)	80 - 95	6 - 9	0	→	41 - 51	0.3 - 1.4	500 - 1'500	-
Marnes gréseuses	(7 - 15)	800 - 3'300	80 - 95	7 - 10	0	→	45 - 53	0.4 - 1.9	700 - 3'200	600 - 3'200
Marno-grès	14 - 19	1'500 - 4'000	80 - 95	10 - 15	0	→	53 - 59	0.7 - 2.0	1'300 - 3'900	1'500 - 3'500
Grès fins et grès fins à moyens	14 - 35	3'000 - 5'000	80 - 95	15 - 20	0	→	60 - 63	0.6 - 3.2	2'600 - 4'900	3'300 - 4'000

***Tableau 2** : Barrage de Chancy-Pougny – Estimation des caractéristiques du massif rocheux selon l'approche de Hoek and Brown.*

- Etape 3 : l'analyse géologique a mis en évidence que la masse rocheuse ne présentait pas de faiblesses liées à une altération homogène du massif ou une fracturation intense. Par contre, elle peut avoir des faiblesses liées à la stratification qui pourrait induire une rupture selon un plan de glissement couche sur couche. Pour cette raison, des essais de cisaillement direct ont été effectués au laboratoire de l'EPFL - 13 sur des surfaces naturelles de stratification et 3 sur des surfaces de rupture. Les résultats donnent des angles de frottement à "l'échelle de l'échantillon".

Roche	Surface	Echantillon	JRC	Cisaillement direct		Valeurs moyennes		
				ϕ [°]	c_{res} [kPa]	Nbre d'essais	ϕ [°]	c_{res} [kPa]
Marnes argileuses	Stratification	SC11-03-AM-34.5-S	11	14	0.0	2	14	0.8
Marnes argileuses	Stratification	SC11-03-AM-34.7-S	11	14	1.5			
Marnes	Stratification	SC11-03-AV-26.3-S	7	26	0.7	3	21	11.7
Marnes	Stratification	SC11-02-AX-32.6-S	1.5	20	4.6			
Marnes	Stratification	SC11-02-AX-45.3-S	14	17	29.8			
Marnes gréseuses	Stratification	SC11-02-AM-28.1-S	11-14	25	0.0	2	25	1.4
Marnes gréseuses	Stratification	SC11-02-AM-28.4-S	7	25	2.8			
Marno-grès	Stratification	SC11-03-AX-29.5-S	2.5	28	1.1	2	29	0.6
Marno-grès	Stratification	SC11-03-AX-38.7-S	2.5	30	0.0			
Grès fins	Stratification	SC11-03-AM-29.1-S	11	32	0.4	2	32	0.2
Grès fins	Stratification	SC11-03-AM-30.5-S	7	31	0.0			
Grès fins à moyens	Stratification	SC11-03-AV-23.3-S	14	38	3.8	2	35	3.0
Grès fins à moyens	Stratification	SC11-03-AM-26.8-S	14	31	2.2			
Marno-grès altéré	Fracture à 35° (incrust.)	SC11-03-AV-19.1-S	11-14	15	11.6			
Marno-grès altéré	Fracture à 35° (argile mm)	SC11-03-AX-29.5-S	14	21	1.7			
Grès fins	Fracture subverticale	SC11-03-AX-27.2-S	1.5	34	0.0			

***Tableau 3** : Barrage de Chancy-Pougny – Résultats des essais de cisaillement direct ; contrainte normale : 0,2, 0,3 et 0,4 MPa.*

- Etape 4 : sur la base des résultats des étapes précédentes, les zones de rupture potentielles ont été identifiées. Elles sont présentées ci-après sur la figure 6. L'étude de stabilité a été menée selon les recommandations du groupe de travail « justification des barrages poids » du CFBR [3].

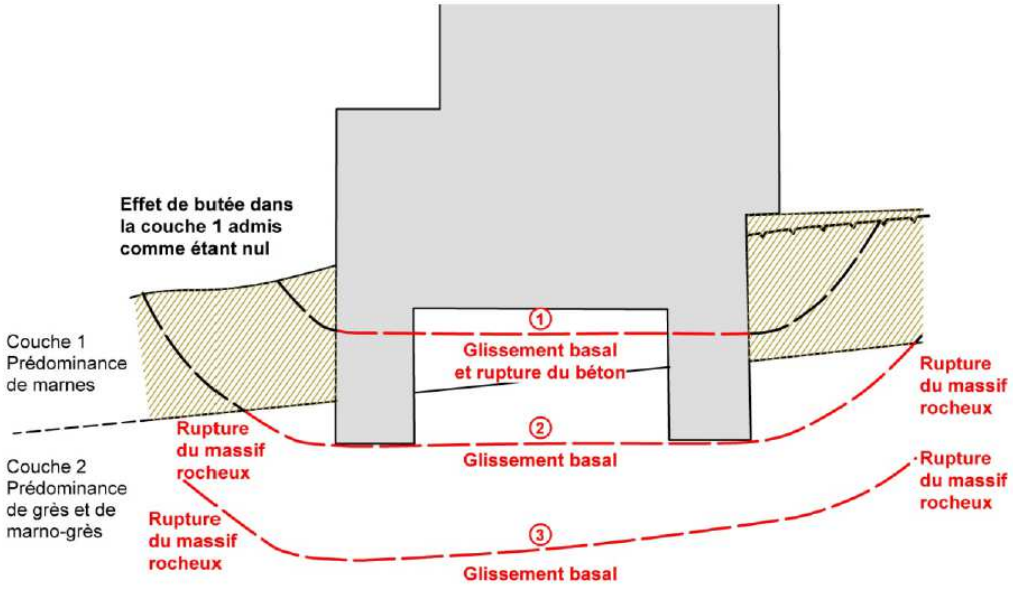

***Figure 6** : Barrage de Chancy-Pougny – Modes de glissement potentiels*

2.2 Approches calculatoires

Le classement du barrage par l'OFEN en classe II (selon règlementation suisse) a permis de fixer les principales spécifications minimales prises en compte dans les calculs sismiques :

- période de retour du séisme : 5 000 ans
- accélération horizontale de pointe : a_h = 2.3 [m/s^2] (classe de sol de fondation A)
- accélération verticale de pointe : a_v = 2/3 x 2.3 = 1,53 [m/s^2]

Selon la réglementation française, le barrage de Chancy-Pougny – est affecté dans la classe B au sens du décret n°2007-1735 du 11 Décembre 2007. Si l'on se réfère au rapport "Risque sismique et Sécurité des ouvrages hydrauliques" [4] qui viendra en appui de la future règlementation française en terme de justification des barrages, le séisme de vérification qui serait à retenir est le "Séisme d'Evaluation de la Sécurité" (**SES**) défini comme suit :

- Zone de sismicité : 3 (modérée) – secteur de Chancy-Pougny
- période de retour du séisme : 2 500 ans
- accélération horizontale de pointe : a_{hg} = 1.9 [m/s^2]
- accélération verticale de pointe : a_{vg} = 1.4 [m/s^2]

Un avant-projet initial avait été présenté aux autorités de tutelle en mars 2010 avec une solution de confortement par contreventement. L'évaluation sismique consistait en une analyse linéaire dynamique par la méthode du spectre de réponse complétée par une analyse pseudo-statique cumulant les cas de chargement. Or les mesures proposées via cette méthode conservatrice y étaient conséquentes car elles visaient toutes à limiter les contraintes de traction dans les différentes parties de l'ouvrage afin d'empêcher sa fissuration.

Dans ce contexte, l'analyse sismique du barrage a été effectuée à l'aide de deux méthodes :

1. Analyse des parties hautes effectuée par la méthode basée sur les déformations (MbD). L'hypothèse principale est un comportement non linéaire : on laisse les piles du pont supérieur se balancer en admettant une certaine fissuration à leur base; comportement admissible puisqu'il ne remet pas en cause le critère de résistance global du barrage (pas de rupture des parties basses ou d'écroulement du pont supérieur afin de ne pas entrainer un écoulement incontrôlé de la retenue).

La méthode basée sur les déplacements suppose l'acceptabilité d'une incursion de la structure dans le domaine plastique. Elle est illustrée à la figure 7. La courbe effort - déformation latérale d'un bâtiment y est tracée schématiquement. Débutant par une partie linéaire, la courbe s'incurve progressivement au fur et à mesure de l'augmentation de l'effort latéral (progression de l'endommagement) jusqu'à atteindre un

maximum pour ensuite diminuer à l'approche de l'effondrement. L'état du bâtiment est schématiquement illustré au-dessous de chaque stade significatif. Cette figure montre clairement que les divers stades d'endommagement sont associés à de grands changements au niveau de la déformation, alors que seuls de petits changements apparaissent au niveau de la force.

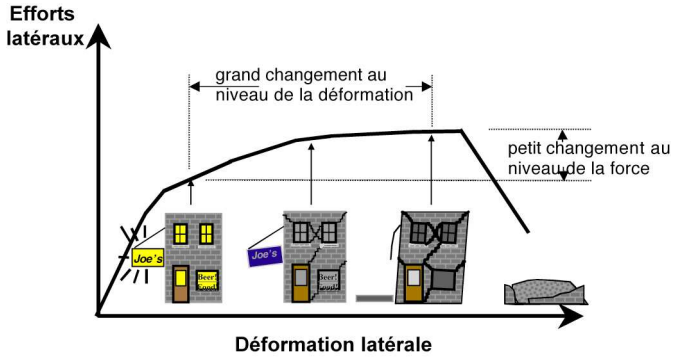

***Figure 7** : méthode basée sur les déformations est supérieure aux méthodes classiques basées sur les forces pour l'évaluation sismique car elle permet de mieux discerner le stade d'endommagement.*

Avec la méthode basée sur les déformations, on peut discerner quel stade d'endommagement le bâtiment va subir. A la lumière de cet exemple illustratif, la méthode basée sur les déformations permet une optimisation de l'analyse coût – bénéfice contrairement aux méthodes classiques basées sur les forces pour l'évaluation sismique car elle permet une prédiction plus précise du stade d'endommagement.

Cette méthode, qui a été reprise dans la nouvelle norme SIA 2018 et dans les Eurocodes 8, a conduit à une réduction significative des renforcements pour le barrage de Chancy-Pougny puisque ce dernier présente une situation très favorable avec une capacité de déplacement du pont supérieur nettement plus grande que la demande.

2. Analyse des parties basses, en eau, ont été calculées comme lors des études d'avant-projet par la méthode du spectre de réponse (SdR) avec prise en compte des efforts issus des parties hautes (le poids du pont supérieur et les actions sismiques qui découlent de l'analyse en déplacement ont été introduits en tête de piliers sous forme de forces et de moments). Un comportement sismique impliquant des déformations permanentes n'est pas admissible pour cette partie de l'ouvrage car cela empêcherait le fonctionnement des vannes et pourrait causer une importante fissuration, non souhaitable dans cette partie de l'ouvrage. La méthode du spectre de réponse, fondamentalement élastique linéaire avec les hypothèses admises, correspond à ces exigences.

Cette analyse en dissociant le barrage selon deux méthodes a constitué une "première approche" qui a été complétée par une deuxième approche à l'aide d'un modèle global de rebouclage dont l'objectif était double:

- Vérifier que le modèle "MbD" du pont supérieur intégrait bien la transmission des actions sismiques depuis le sol de fondation et les piliers.
- S'assurer de la bonne définition des actions en provenance du pont supérieur, actions qui ont été appliquées aux piliers dans le modèle "SdR".

3. PROJET DÉFINITIF DE CONFORTEMENT

Les dispositions retenues dans le-projet définitif sont ici présentées suivant leur localisation sur le barrage en distinguant :

- les parties basses : en dessous de la cote (348,50),
- les parties hautes : au-dessus de la cote (348,50).

3.1 Parties basses : amélioration des bétons par injection

Les objectifs des injections sont l'amélioration de la qualité des bétons, le remplissage de vides et l'étanchement des zones perméables actuelles. On cherchera tout particulièrement :

- à consolider les piliers 1, 2, 3, 4, l'aile rive gauche et le mur rive droite du barrage en homogénéisant les bétons et en comblant les cavités et les nids de gravier,
- à injecter les interfaces radier/pilier et le contact béton/fondation.

3.2 Parties basses : confortement des piliers I, II et III par des butons en béton

Le comportement des piliers sous sollicitations sismiques nécessite la mise en place de butons en tête de ces derniers afin de reprendre le basculement rive-rive et limiter au mieux le développement des contraintes de traction. La raison est que la plus grande partie des sollicitations provient des masses d'eau entraînées situées entre les piliers. Les recommandations de l'OFEN considèrent de façon conservative une masse d'eau entrainée dans le sens transversal comme si l'obstacle des piliers était infini.

Les dispositions suivantes ont été retenues dans le projet définitif:

- Les butons seront en béton pour des questions de durabilité et de fonctionnement structurel : les liaisons piliers/butons seront libres dans la direction rive-rive afin que les butons travaillent uniquement en compression ce qui évitera d'introduire des efforts de traction dans les liaisons avec les piliers.
- Les butons aval présenteront une section transversale de 0,85 m x 0,70 m de hauteur, un axe longitudinal à la cote (348,15) implanté 3,60 m en aval de l'axe du barrage.
- Les butons amont auront une section transversale de 2,30 m x 0,50 m de hauteur, un axe longitudinal à la cote (349,65) implanté 5,92 m en amont de l'axe du barrage.
- L'entre axe entre butons amont et aval sera de 9,52 m afin de dégager un gabarit suffisant pour le passage des vannes et du batardeau amont.
- Le niveau de l'axe du buton amont est rehaussé à la cote (349,65) soit près de 2,40 m au dessus du niveau de la retenue normale afin d'éviter l'accumulation des embâcles.
- Les butons amont serviront de plateforme de circulation pour l'exploitant, améliorant ainsi d'un point de vue de la sécurité des personnes la méthodologie de mise en place des batardeaux AM.

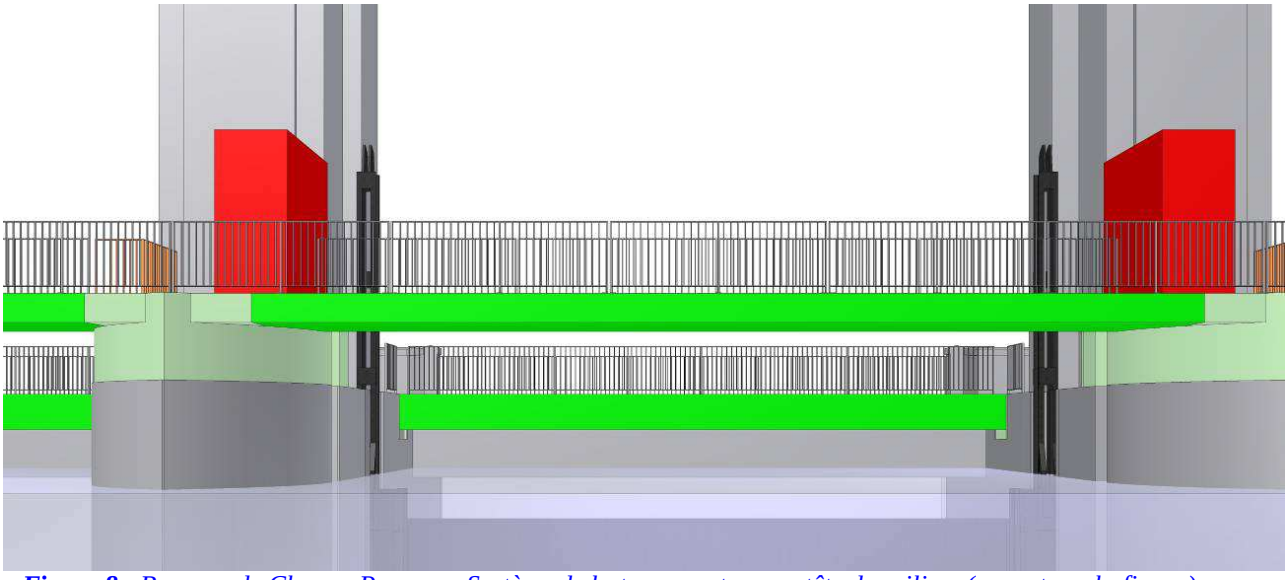

***Figure 8** : Barrage de Chancy-Pougny – Système de butonage retenu en tête des piliers (en vert sur la figure)*

3.3 Parties basses : confortement des piliers par des armatures passives répartis sur le pourtour

La mise en place des butons en tête des piliers, et ce quelle que soit la configuration étudiée, ne permet pas d'obtenir des contraintes de traction inférieures à la résistance à la traction dynamique admise ftd = 1,8 N/mm² dans une approche en section homogène.

Le mauvais état des bétons a conduit à écarter l'ajout de précontrainte qui aurait dû être très importante pour réduire suffisamment les efforts de traction. La disposition suivante a été retenue dans le projet définitif:

- Forage et scellement d'ancrages passifs d'environ 19,00 m de longueur répartis sur le pourtour des trois quarts amont des piliers.

Plus nombreux que des câbles de précontraintes et mieux répartis, ils ne sollicitent pas la structure en situation normale et sont en mesure de reprendre la traction et le cisaillement en cas de séisme dans un fonctionnement en béton armé.

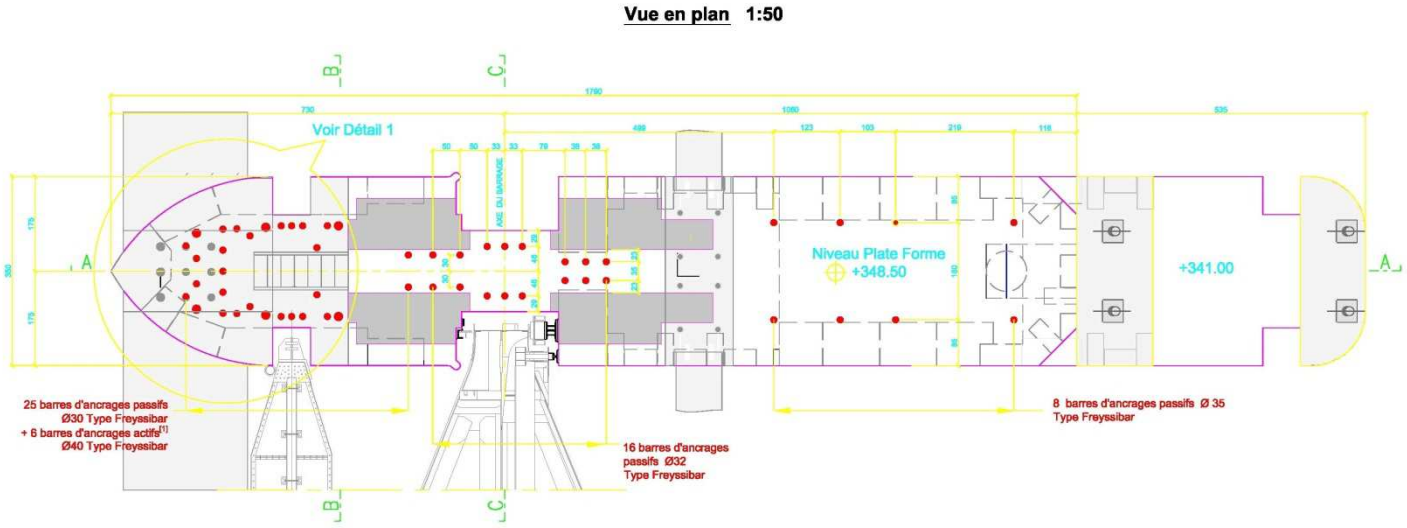

***Figure 9** : Barrage de Chancy-Pougny – Système de barres passives sur le pourtour des piliers (points rouges)*

3.4 Parties basses : confortement anti-glissement des piliers par tirants actifs

L'étude et les essais géologiques de 2011 ont permis de requalifier les propriétés de la fondation. Les valeurs caractéristiques de résistance à la rupture ont été estimées dans la plage des contraintes effectives s'exerçant sous le barrage (200 à 400 kPa). Cette démarche a conduit à retenir un angle de frottement plus élevé dans la masse des couches gréseuses (60°) ce qui permet de faire participer de manière très significative la résistance en butée de la fondation aval barrage.

Ainsi, les calculs effectués dans l'étude de stabilité ont montré que, sous sollicitation sismique, la tendance au basculement et le glissement vers l'aval peuvent être repris par une force inclinée à 65° par rapport à l'horizontale – évaluée à 12 000 kN – appliquée sur les arrière-becs des piliers à la cote (341,00) et par une résistance verticale de 3200 kN appliquée depuis les avant-becs à la cote (348,50).

Ces forces stabilisatrices peuvent être obtenues au moyen de:

- 4 tirants actifs aval inclinés, de 38,50 m de longueur, tendus à 3 000 kN et ancrés sur environ 15,00 m dans les couches saines de grès marneux,
- 6 barres actives amont verticales, DN 40, tendues à 60% de leur force de rupture caractéristique et scellées sur environ 11,00 dans le rocher.

Ces dispositions sont représentées sur la **figure 10** ci-après.

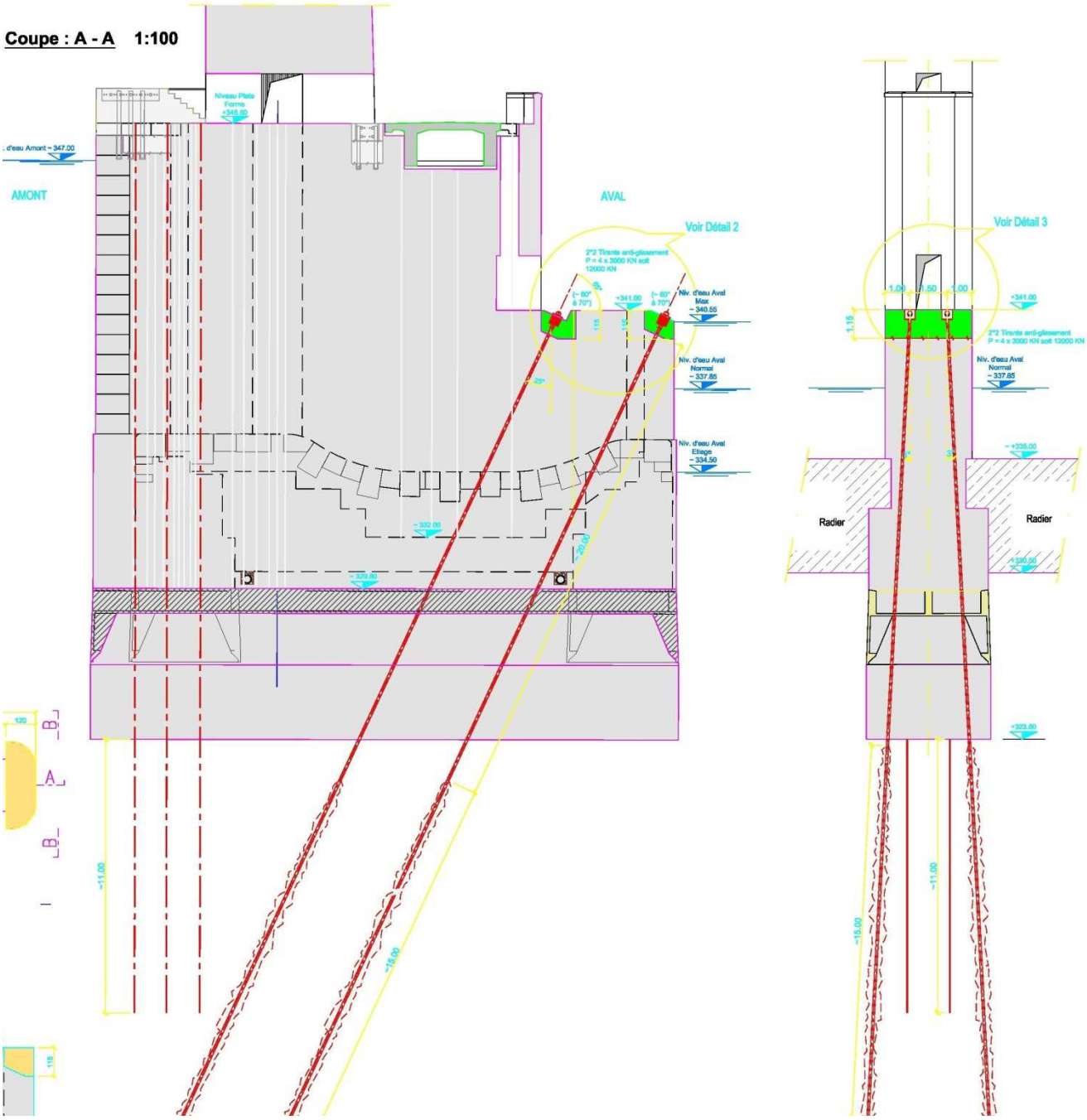

Figure 10 : *Barrage de Chancy-Pougny - Confortement de stabilité des piliers par tirants actifs*

3.5 Parties hautes : ancrage de la culée rive droite dans le talus et mise en place d'appareils d'appui glissants

La culée rive droite est apparue vulnérable suite à l'augmentation de la poussée des terres pendant un séisme (basculement autour de l'axe amont-aval) et le talus s'est avéré instable au grand glissement, localement sous la culée, du fait de l'augmentation des charges verticales.

Le confortement retenu consiste à ancrer la culée par l'intermédiaire de 4 tirants actifs permanents suivant les dispositions représentées sur la figure 11. Les derniers calculs qui tiennent compte du remplacement des appuis existants du pont par des appuis glissants multidirectionnels montrent que la stabilité d'ensemble du système (talus+culée) vis-à-vis des sollicitations sismiques nécessite d'appliquer un effort global de 8 640 kN. Cette force peut être obtenue par 4 tirants tendus à 2 160 kN.

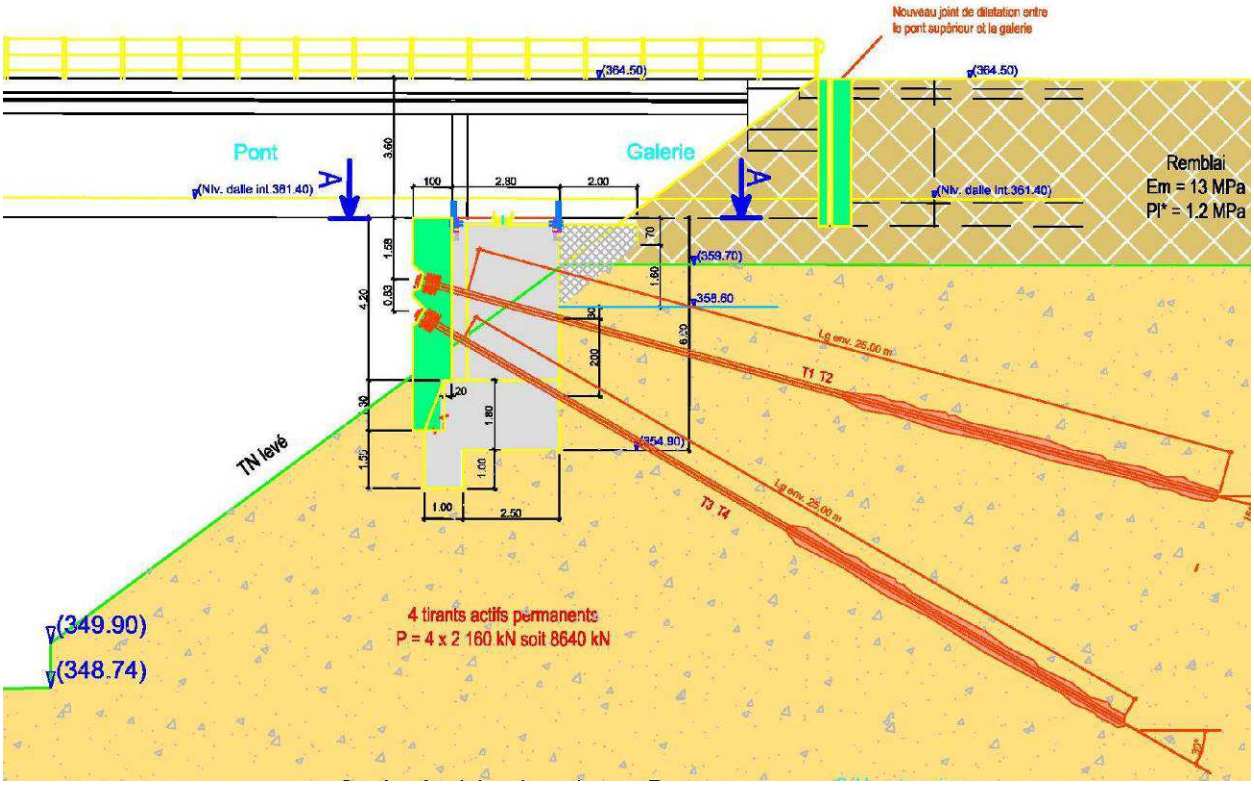

Figure 11 : *Barrage de Chancy-Pougny - Ancrage de la culée rive droite dans le talus*

3.6 Parties hautes : confortement de la tour des câbles par un corset de 8,00 m de hauteur

Les bielles de compression qui se développement entièrement dans la masse du béton lors des phénomènes de basculement sont capables de transmettre les efforts depuis la tête de la tour jusqu'au pied de cette dernière.

Toutefois, compte tenu de la mauvaise qualité du béton, un corset ou chemisage sera construit autour de la tour sur 8 mètres de hauteur. Il s'agit là d'une mesure préventive très efficace qui doit permettre de :

- Renforcer le pied de la tour qui présente des bétons très altérés et fissurés. Le corset joue ici le rôle de béton de substitution.
- Fréter localement les sections en jeu pour éviter l'éclatement lors de la descente des bielles de compression.
- Conserver une rotule en utilisant le ferraillage du corset afin d'assurer le balancement de la tour (rocking).

Les fibres d'aramide ou époxy ont été écartées en raison de leur coût et des angles vifs sur la section.

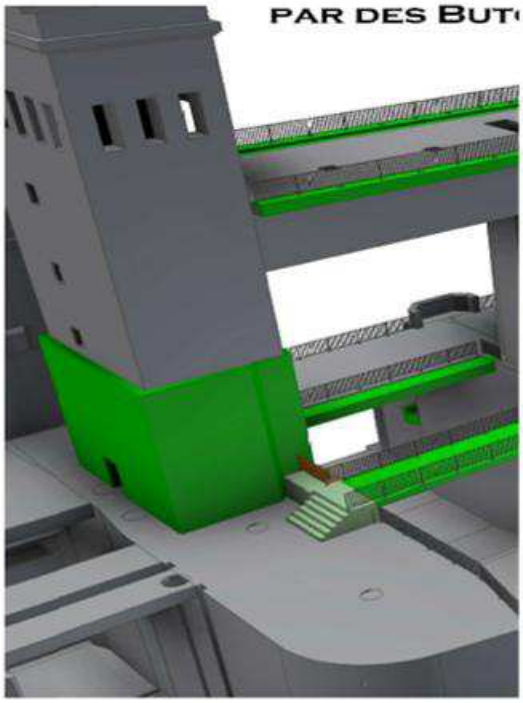

Figure 12 : *Barrage de Chancy-Pougny – Corset de la tour des câbles*

4. CONCLUSIONS

L'approche du comportement sismique du barrage de Chancy-Pougny par une méthode non linéaire basée sur les déformations – pour la partie superstructure – a permis de réduire significativement les renforcements qui étaient à la limite de la faisabilité par une approche linéaire élastique.

Les renforcements proposés répondent à des faiblesses soit conceptuelles soit constructives pour un ouvrage conçu hors séisme et réalisé en 1920 : fragilité dans la direction rive-rive (non sollicitée en service) par des butons en compression, résistance interne des piliers par injections et ferraillage passif, glissement sur la fondation par des tirants actifs.

5. RÉFÉRENCES

[1] OFEN 2003, « Sécurité des ouvrages d'accumulation – Documentation de base pour la vérification des ouvrages d'accumulation au séisme ».

[2] NORBERT Géologues-Conseil SA (14 Septembre 2011), « Rapport géologique du barrage de Chancy-Pougny ».

[3] CFBR, groupe de travail "justification des barrages poids" (Mai 2012), « Recommandation pour la justification de la stabilité des barrages-poids ».

[4] CFBR, groupe de travail "séisme et barrages" (Novembre 2010), « Risque sismique et Sécurité des ouvrages hydrauliques ». Rapport rédigé à la demande du MEDDTL-DGPR.