

CISAILLEMENT AU CONTACT BETON-ROCHER DES BARRAGES-VOUTES : PREMIER RETOUR SUR LA MISE EN APPLICATION DES RECOMMANDATIONS CFBR

Shear at the dam-foundation contact : first feed back on the use of the french arch dams guidelines

Emmanuel ROBBE, Grégory COUBARD, Willy TSOPMO KEUMEDJIO

EDF Hydro, 4 allée du lac de Tignes, La motte Servolex

emmanuel.robbe@edf.fr, gregory.coubard@edf.fr

MOTS CLEFS

Barrages-voûtes, Cisaillement, Glissement, Contact béton-rocher, Cohésion mobilisée

KEY WORDS

Arch dam, shear, sliding, dam-foundation interface, mobilized cohesion

RÉSUMÉ

En 2018, le CFBR a publié les recommandations provisoires pour la justification du comportement des barrages voûtes. Ces recommandations proposent d'évaluer le comportement des ouvrages vis-à-vis de mécanismes de rupture potentiels déterminés à partir de l'accidentologie, de l'incidentologie et de l'extrapolation des résultats de modélisation. Parmi les mécanismes considérés, les mécanismes de glissement le long des appuis et de non-reprise des efforts en pied des plots centraux de la voûte sont en particulier analysés. Pour évaluer le comportement des ouvrages vis-à-vis de ces modes de rupture, les recommandations proposent de calculer, plot par plot, l'équivalent d'un coefficient de sécurité au glissement. Dans la mesure où cette vérification ne faisait pas vraiment l'objet d'une analyse lors de la conception de la plupart des ouvrages, il a été convenu de ne pas définir de critère chiffré sur ce coefficient en attendant de disposer d'un retour suffisant de valeurs obtenues sur des ouvrages existants.

L'objectif de cette communication est de présenter un premier retour sur les valeurs de cohésion mobilisée obtenues après calculs aux éléments finis sur certains ouvrages du parc de barrage exploité par EDF. Ces valeurs seront analysées et discutées au regard des mécanismes en jeu et des hypothèses retenues.

ABSTRACT

In 2018, the French committee on dams and reservoirs published temporary guidelines for the safety evaluation of arch dams behavior. These guidelines proposed to assess the behavior of arch dams considering potential failure mechanisms, identified from past accidents, incidents and extrapolation of numerical analyses. Among the failure mechanisms considered, sliding along the abutment and shear overloading at the toe of the central cantilevers are particularly investigated. The French guidelines proposed to compute for each cantilever, an equivalent sliding coefficient. Considering that it was not considered in the original design of the dams, the guidelines do not define any target values.

The aim of this paper is to present a first feedback of mobilized cohesion from finite-element analyses on a certain amount on dams, owned by EDF. These values will be analyzed and discusses considering the failure mechanisms, the chosen assumption and the original design of the arch dams in France.

1. RECOMMANDATIONS PROVISOIRES DU CFBR POUR LA JUSTIFICATION DU COMPORTEMENT DES BARRAGES-VOUTES – CISAILLEMENT DANS LA ZONE DU CONTACT BETON-ROCHER

En 2018, le CFBR a publié les recommandations provisoires pour la justification du comportement des barrages voûtes [1]. Ces recommandations proposent d'évaluer le comportement des ouvrages vis-à-vis de mécanismes de rupture potentiels déterminés à partir de l'accidentologie, de l'incidentologie et de l'extrapolation des résultats de modélisation. Parmi les différents mécanismes considérés, les mécanismes de glissement le long des appuis et de non-reprise des efforts en pied des plots centraux de la voûte sont en particulier analysés.

1.1. Glissement le long d'un appui

Ce mode de rupture s'inspire de l'accident du barrage de Meihua en 1981 : implanté dans une vallée large et équipé d'un joint périmétral bitumineux, les expertises menées post-accident concluent à un mécanisme de glissement le long de ce joint amenant à une surcharge des plots d'extrémités, conduisant à la rupture totale de l'ouvrage. Cette rupture attire l'attention sur la transmission des efforts entre la voûte et la fondation et la mobilisation des caractéristiques de cisaillement dans la zone du contact béton-rocher. Il faut cependant rappeler que dans le cas du barrage de Meihua, la particularité de conception du joint périmétral bitumineux [3] est particulièrement défavorable par rapport aux conceptions classiques d'ouvrage avec des plots encastrés dans le rocher et reposant sur une surface présentant des irrégularités.

1.2. Non-reprise des efforts en pied des plots centraux

Pour les ouvrages implantés en vallées larges ou présentant un fond plat, la mise en extension du pied amont, qui accompagne le mouvement de flexion des consoles vers l'aval sous l'effet du chargement de la retenue, des conditions thermiques et/ou des évolutions irréversibles de l'ouvrage, se traduit par un desserrement de la zone du contact barrage-fondation. Plusieurs barrages-voûtes sont représentatifs de cette problématique et bien qu'aucun cisaillement en pied susceptible de mettre immédiatement en cause la sûreté d'un ouvrage n'ait été observé, la question de la reprise des efforts en pied des plots centraux sous l'effet de l'ouverture de la zone de contact et la propagation des sous-pressions est posée.

1.3. Analyses associées aux mécanismes de ruptures étudiés

Vis-à-vis des deux modes de ruptures discutés ici, les analyses menées se basent sur les résultats des calculs par éléments-finis et en particulier la comparaison des contraintes ou efforts normaux et tangentiels au contact béton-rocher ainsi que sur la connaissance des caractéristiques de cisaillement à cette interface. Les analyses varient selon la complexité du modèle numérique mis en œuvre :

- Dans le cadre d'une approche élastique linéaire, l'analyse consiste à rechercher les zones soumises à des contraintes de traction excessives ou en cisaillement excessif en évaluant un coefficient de stabilité par plot ou sur une ligne amont-aval par l'intégration des contraintes. Dès lors qu'une zone significative est concernée par l'un ou l'autre des mécanismes (traction / cisaillement), une approche non-linéaire doit être mise en œuvre.
- Dans le cadre d'une approche non-linéaire permettant de modéliser des adaptations locales dans la zone du contact béton-rocher, une modélisation de type élastoplastique peut être mise en œuvre afin de tirer profit du caractère hyperstatique des voûtes. Une telle modélisation permet de vérifier le report des efforts de cisaillement excessifs dans les zones adjacentes et de statuer sur le comportement global de la voûte.

Dans le cadre de cet article, on s'intéressera plus particulièrement à la comparaison des efforts normaux et tangentiels calculés plots par plots sur l'ensemble de l'ouvrage. Cette approche constitue la première étape de l'analyse qui vient d'être décrite.

2. CALCULS DE CONCEPTION DES BARRAGES-VOÛTES EDF

En amont de l'analyse des conditions de transfert des efforts de cisaillement à la base des plots des voûtes, il paraît intéressant de revenir sur la façon dont les barrages voûtes du parc EDF ont été dimensionnés. Le Tableau 1 synthétise, pour chaque ouvrage, la méthode la plus avancée (certains ouvrages ont fait l'objet de plusieurs types d'analyse) utilisée pour le dimensionnement d'une part importante des barrages voûtes et poids-voûtes du parc EDF. Dans le cadre limité de cet article, on ne reviendra pas sur le détail des méthodes de calcul utilisées suffisamment décrites dans la littérature spécialisée. Elles sont regroupées en 3 catégories :

- 'arcs' : signifie que l'ouvrage a été dimensionnée en considérant des arcs indépendants. Cette catégorie regroupe en particulier les calculs en arcs indépendants horizontaux ou plongeants ainsi que le calcul en voûtes actives.
- 'arcs-console' : signifie qu'un ajustement a été réalisé pour tenir compte des effets consoles. Dans la majeure partie des cas, seul un ajustement des déplacements radiaux en clés a été effectué. La mise en œuvre de la méthode Trial-Load avec un ajustement complet des déplacements et moments n'a vraiment été menée que pour les barrages de Laparan, Saint-Guerin et Sainte-Croix.
- 'EF' : signifie qu'un calcul éléments-finis a été réalisé à la conception.

Sur les 48 voûtes analysées, seules 7 ont été dimensionnées par éléments-finis, 20 en considérant un ajustement entre arcs et consoles et 21 à partir d'un raisonnement en arcs indépendants. Il est intéressant de constater que la majeure partie des voûtes ont donc été dimensionnées à partir de méthodes relativement simplifiées vis-à-vis des complexes calculs par éléments-finis actuellement réalisés. Ces méthodes évaluaient uniquement les contraintes dans les arcs (aux naissances et en clé, à l'intrados et extrados) et éventuellement au niveau de la console centrale lorsqu'un ajustement arcs-console était réalisé. La Figure 1 synthétise les contraintes maximales calculées pour un certain nombre de voûtes dont le détail des calculs a pu être retrouvé au moment de la rédaction de cet article :

- Les contraintes d'arc en clef et aux naissances en fonction de l'année de construction,
- Les contraintes de console en fonction du ratio L/H de l'ouvrage.

La majeure partie des calculs prennent en compte le chargement thermique hiver et été pour évaluer les contraintes maximales des voûtes en conditions normales :

- les contraintes de compression calculées au dimensionnement ont eu tendance à s'accroître au fur et à mesure des années de construction jusqu'à atteindre 8 à 10 MPa.
- Les tractions calculées dépassent rarement 2 MPa dans les situations les plus défavorables.

Vis-à-vis des mécanismes de glissement le long des appuis ou de non-reprise d'efforts au pied des consoles centrales, aucune analyse spécifique n'a été menée à la conception des voûtes du Tableau 1 néanmoins :

- Pour les barrages avec une culée-poids, cette dernière fait généralement l'objet d'un calcul de stabilité au glissement,
- La méthode de calcul en arc indépendant négligeant l'effet console, on peut considérer que dans le cas d'une voûte implantée en vallée large, le calcul de l'arc inférieur est assez proche de la méthode proposée au §1.3 consistant à modéliser par une loi élastoplastique le contact béton-rocher pour évaluer le report des efforts.

Pour le barrage de Sainte-Croix sur Verdon, compte tenu de la fondation de la voûte en partie centrale sur un socle en béton, le cisaillement au pied des consoles centrales a fait l'objet d'une analyse spécifique : les taux de cisaillement en pied ainsi qu'un coefficient de frottement (ne tenant pas compte des sous-pressions) ont été calculés. Pour ce dernier une cohésion de 5 MPa et un angle de frottement de 38.5° ($\tan \phi = 0.8$) ont été considérés aux interfaces béton-béton : ce coefficient devait être supérieur à 5.

Tableau 1 Méthode de dimensionnement des voûtes

NOMS	type de barrage	Hauteur (m)	année fin constr	Methode de calcul
AIGLE	PG/VA	92	1947	arcs
BAGÉ	VA	28	1952	arcs-console
BARTHE	VA	72	1974	EF
BORT LES ORGUES	PG/VA	125	1951	arcs-console
CASTILLON	VA	100	1948	arcs
CHASTANG (LE)	PG/VA	85	1951	arcs
CHAUDANNE	VA	74	1952	arcs-console
COUESQUE	VA	70	1950	arcs
ENCHANET	VA	68	1951	arcs-console
GAGE II (LE)	VA	42	1967	arcs-console
GITTAZ (LA)	PG/VA	67	1967	arcs-console
GLORIETTES (LES)	VA	45	1951	arcs
GOUR NOIR (LE)	VA	44	1947	arcs
GRANGENT	VA	55	1957	arcs-console
HAUTEFAGE	VA	57	1958	arcs-console
JOTTY (LE)	VA	57	1949	arcs
LANAU	VA	32	1962	arcs-console
LANOUX (LE)	VA	48	1960	arcs
LAOUZAS	VA	52	1965	arcs-console
LAPARAN	VA	106	1985	EF
LUZEGE (LA)	VA	44	1951	arcs
MAURY	VA	72	1947	arcs
MONCEAUX LA VIROLE	VA	34	1946	arcs
MONTEYNARD	VA	155	1963	arcs-console

NOMS	type de barrage	Hauteur (m)	année fin constr	Methode de calcul
NAGUILHES	VA	61	1959	arcs
PALISSE (LA)	VA	57	1954	arcs
PARELOUP	VA	47	1951	arcs-console
PLAN D'AVAIL	VA/PG	50	1950	arcs
PONT DE SALARS	VA	38	1952	arcs-console
PONVIEL	VA	23	1980	EF
QUINSON	VA	54	1974	EF
RIETE	VA	37	1956	arcs
ROSELEND	VA/CB	150	1961	arcs
ROUJANEL (LE)	VA	57	1965	arcs-console
SAINT ETIENNE CANTALES	PG/VA	75	1945	arcs
SAINT GUERIN	VA	68	1961	arcs-console
SAINT PIERRE COGNET	VA	80	1960	arcs-console
SAINTE CROIX	VA	95	1974	EF
SIROUS	VA	25	1936	arcs
TAKAMAKA II	VA	29	1988	EF
TECH (LE)	VA	33	1951	arcs
TIGNES	VA	180	1952	arcs-console
TOLLA	VA	90	1961	arcs-console
TREIGNAC	VA	24	1952	arcs-console
VALETTE (LA)	VA	50	1949	arcs-console
VAUSSAIRE	VA	31	1952	arcs
VILLEFORT	VA	75	1965	arcs
VOUGLANS	VA	130	1968	EF

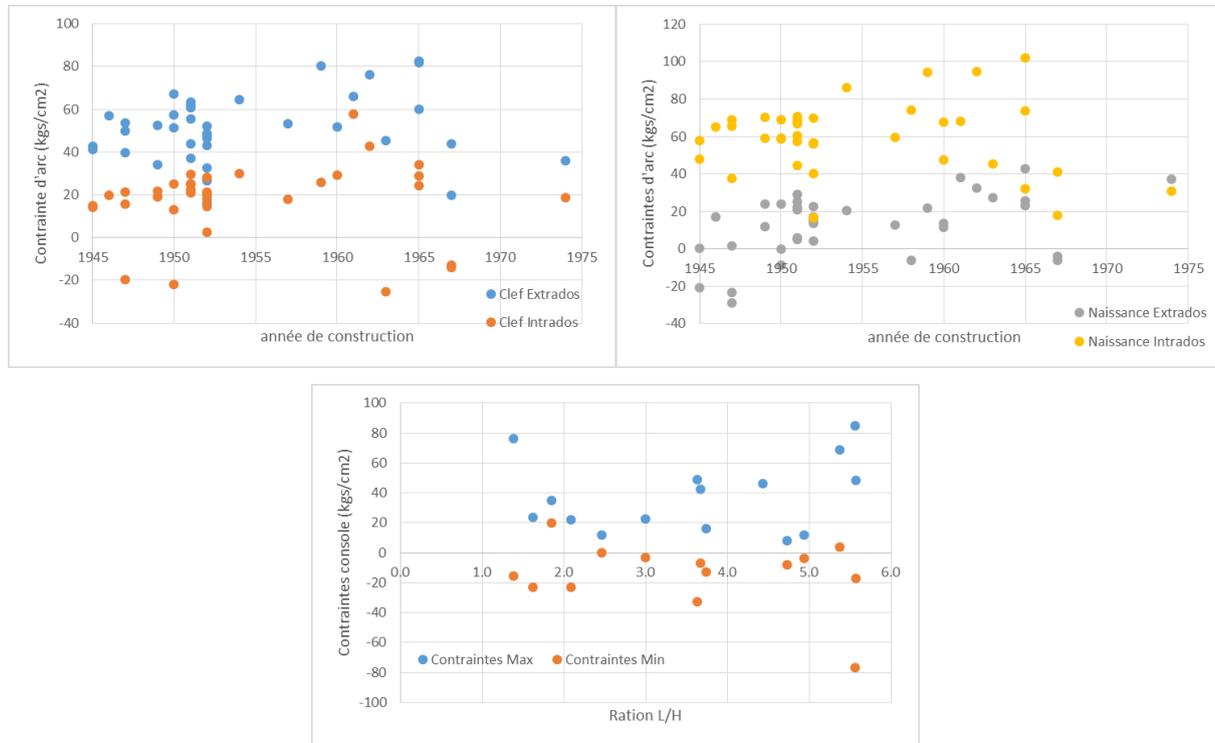


Figure 1 synthèse des contraintes d'arc et de consoles calculées pour le dimensionnement de voûtes

3. ANALYSE DU COMPORTEMENT DE BARRAGES-VOÛTES : COHESION MOBILISÉE AUX INTERFACES PLOTS-FONDATION

L'analyse associée aux mécanismes de rupture étudiés propose de comparer les efforts normaux et tangentiels en évaluant un coefficient de stabilité au glissement par plot. Ce coefficient dépend en particulier des caractéristiques de résistance au cisaillement du contact béton-rocher : angle de frottement et cohésion.

Cette analyse a déjà été réalisée sur un certain nombre de barrages-voûtes et l'objectif est ici de présenter les cohésions qui doivent être mobilisées en considérant un angle de frottement de 45° pour s'assurer que les efforts résistants soient supérieurs aux efforts de cisaillement en tenant compte ou non de la sous-pression. Les contacts béton-rocher des plots sont modélisés par des plans. Plusieurs situations de calcul sont considérées : RN, RN + hiver, RN + été (et éventuellement RN + gonflement pour certains ouvrages).

Au total, les résultats obtenus sur 9 barrages-voûtes, dont les hauteurs sont comprises entre 20 et 70 m, sont présentés dans la suite de ce chapitre.

Ces résultats permettent de donner des ordres de grandeur des cohésions mobilisées sur des barrages existants.

3.1. Sollicitations typiques en cisaillement des plots de barrages-voûtes

Les sollicitations en cisaillement des plots d'un barrage-voûte dépendent directement de la situation (ou cas de charge) étudiée. De manière synthétique :

- Les sollicitations maximales des plots centraux ont lieu en hiver (cisaillement dans la direction amont-aval),
- Les sollicitations maximales des plots latéraux (ou culées) ont lieu en été et/ou sous des phénomènes de gonflement des bétons (cisaillement dans la direction rive-à-rive).

La Figure 2 présente pour un ouvrage d'une hauteur d'environ 30 m, la cohésion mobilisée sous chaque plot en limitant l'angle de frottement à 45° . Cette cohésion a été déterminée sans prise en compte des sous-pressions (une analyse spécifique est proposée dans le paragraphe suivant).

N.B. : Les notations présentes dans les légendes des graphiques sont construites de la manière suivante :

- La ou les premières lettres identifie(nt) l'ouvrage (ouvrage « B » dans la figure ci-dessous),
- La suite de la légende donne la situation (« RN » / « RN+E » : été / « RN+H » : hiver / « RN+G » : gonflement),
- La fin de la légende renseigne sur la prise en compte ou non des sous-pressions « SP » dans le calcul des résultantes.

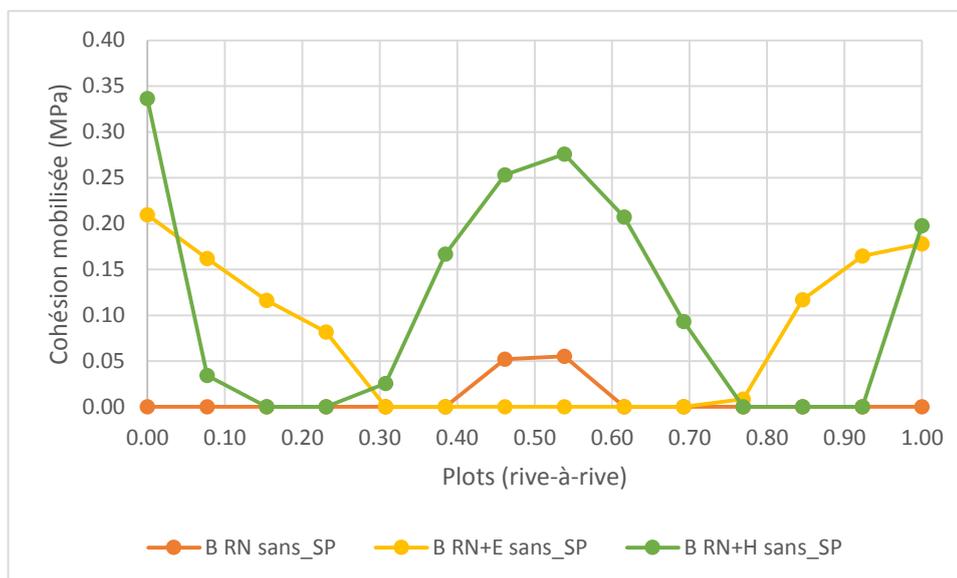


Figure 2 : Cohésions mobilisées sous un barrage-voûte à RN et en situations estivale et hivernale

L'exemple ci-dessus met bien en évidence une sollicitation maximale en cisaillement des plots centraux en hiver et des plots latéraux en été. Les sollicitations obtenues en hiver sur les plots latéraux correspondent à des efforts de cisaillement orientés vers le centre de la vallée sans signification physique réelle (ouverture probable des joints de plots).

Les cohésions mobilisées obtenues sur le barrage, ici pris en exemple, sont d'environ 0,3 MPa sur les plots centraux en hiver et de 0,2 MPa sur les plots latéraux en été (et cela, sans prise en compte des sous-pressions). Ces cohésions calculées sont classiquement obtenues lors d'études de comportement de barrages-voûtes.

3.2. Influence de la prise en compte des sous-pressions

La prise en compte des sous-pressions (profil triangulaire) conduit à une augmentation logique des cohésions mobilisées en partie centrale de la voûte tandis qu'elle peut n'avoir qu'un effet mineur sur les plots latéraux (faible hauteur d'eau au niveau de ces plots). Pour illustrer, la figure suivante reprend les cohésions mobilisées calculées sur le barrage précédent avec et sans prise en compte des sous-pressions.

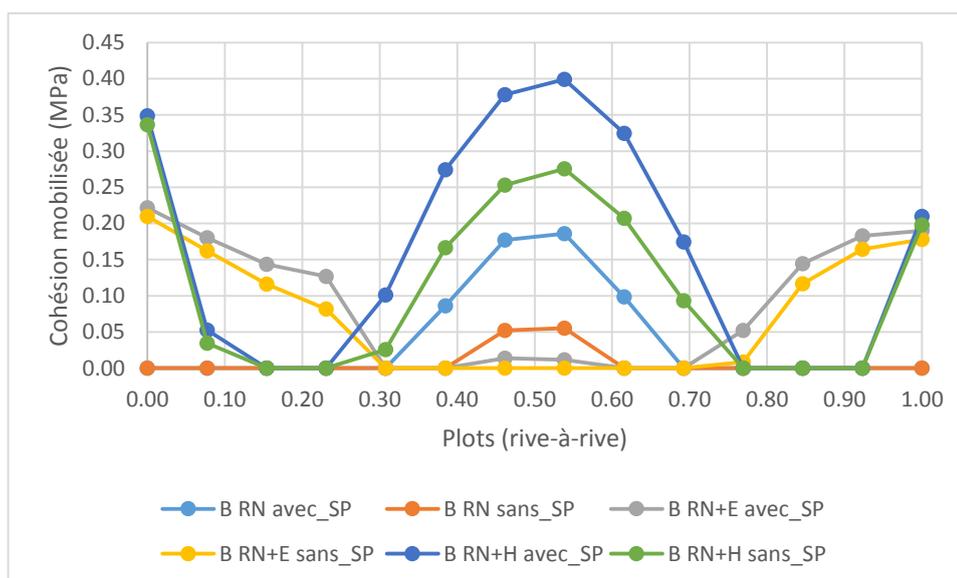


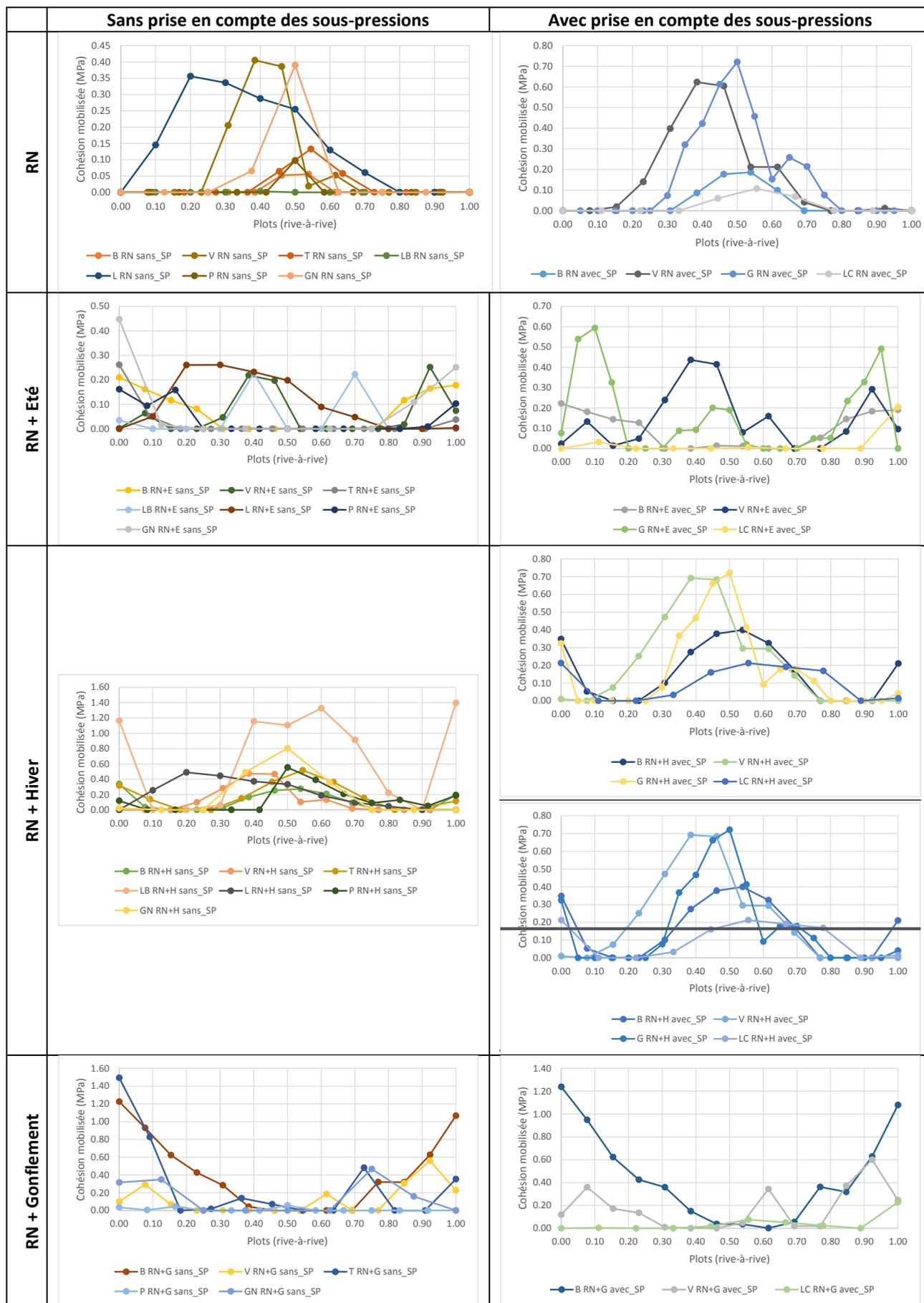
Figure 3 : Cohésions mobilisées sous un barrage-voûte avec ou sans prise en compte des sous-pressions

En partie centrale, la prise en compte des sous-pressions maximisent les cohésions mobilisées calculées. Elles atteignent, sur cet exemple, 0,4 MPa.

3.3. Résultats d'ensemble

Le Tableau 2 présente les cohésions mobilisées d'une rive à l'autre de 9 barrages, en distinguant la prise en compte ou non de la sous-pression (profil triangulaire) et le cas de charge étudié.

Tableau 2 : Concaténation des résultats obtenus sur 9 barrages



En supplément de ces différents graphiques, les commentaires suivants peuvent être faits :

- Suivant la forme du contact barrage-fondation, la courbe des cohésions mobilisées est plus ou moins régulière. L'exemple du barrage « B » pris des paragraphes précédents est typique d'un contact régulier sans changement de pente brusque et avec des surfaces de contacts plots-fondation homogènes.
- La prise en compte des sous-pressions conduit à des majorations importantes des cohésions mobilisées en partie centrale lorsque les barrages sont de grande hauteur (supérieure à 50 m), des valeurs de 0,7 MPa peuvent ainsi être obtenues sans même prendre en compte la situation hivernale. Pour des ouvrages de très grandes hauteurs (supérieur à 100m), les cohésions mobilisées seront vraisemblablement supérieures à 1 MPa.
- La température de clavage ou le scénario de construction ont une influence importante sur les sollicitations obtenues en hiver et en été. Par exemple, un clavage de barrage-voûte en période chaude peut conduire à des sollicitations importantes des consoles centrales en hiver.
- Même avec de faibles gonflements des bétons mais en cours depuis de nombreuses années, les sollicitations des plots latéraux (ou culées) peuvent devenir très importantes (cohésions mobilisées dépassant 1 MPa). Ces situations ont conduit EDF à réfléchir à une approche graduée d'étude de ces barrages-gonflants (cf. paragraphe suivant).
- Sur les 9 barrages-voûtes présentés ici et en prenant en compte les différents cas de charges, la cohésion mobilisée est toujours supérieure à 0,2 MPa sur au moins l'un des plots.
- Pour ces analyses, l'encastrement aval des consoles, plus ou moins important selon les ouvrages n'a pas été pris en compte : cet encastrement, ainsi que la géométrie rarement plane du contact contribue certainement au transfert d'une part importante des efforts de cisaillement.

4. CAS PARTICULIER DES CULEES DE BARRAGES GONFLANTS

Comme cela a pu être mis en évidence dans le paragraphe précédent, pour les barrages-voûtes atteints d'une pathologie de gonflement, les sollicitations en cisaillement des plots de rives ou des culées peuvent devenir très importantes et parfois nécessiter une cohésion supérieure à 1 MPa au contact. Ces fortes sollicitations peuvent être obtenues même en mettant en œuvre des modèles de comportement spécifiques prenant en compte l'ensemble des phénomènes (fluage, endommagement).

Partant du constat que bien que ces sollicitations soient importantes, aucune dégradation majeure, aucun glissement n'a été détecté, EDF a choisi d'adopter une approche graduée permettant d'évaluer pas à pas le comportement de la structure. Ce principe a été présenté à l'occasion du congrès *Dam Swelling Concrete 2017* [2] et est résumé par la figure suivante :

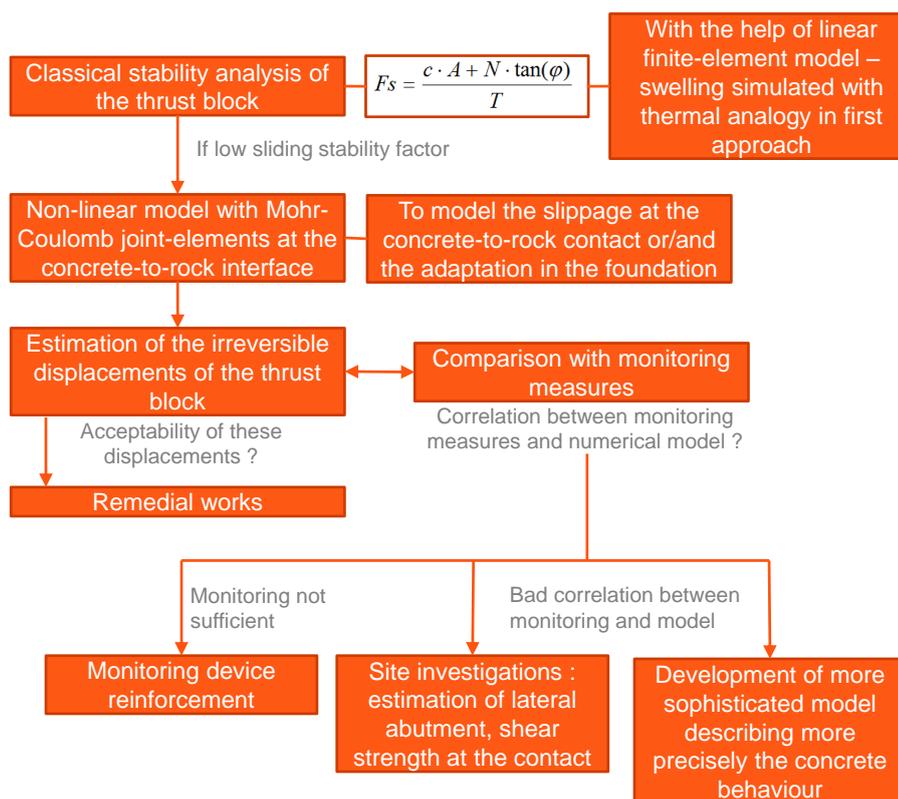


Figure 4 : Principe d'approche graduée pour les barrages-voûtes gonflants avec culées

Cette approche est compatible avec les recommandations CFBR sur les barrages-voûtes de 2018. Elle conduit souvent au renforcement du dispositif d'auscultation sur les plots de rives (pendules, repères topographiques) et à la réalisation de reconnaissances géotechniques afin d'estimer plus finement les caractéristiques mécaniques de l'interface culée-fondation. Les modèles éléments-finis intégrant des éléments-joints au contact permettent d'évaluer le comportement de la structure en cas de déplacement / glissement des culées. Des modèles éléments-finis sur lesquels les culées sont volontairement supprimées peuvent également être mis en œuvre. Ces modèles permettent de porter un avis sur la redistribution des efforts en cas de glissement de la ou des culées (les barrages-voûtes étant par essence des structures hyperstatiques).

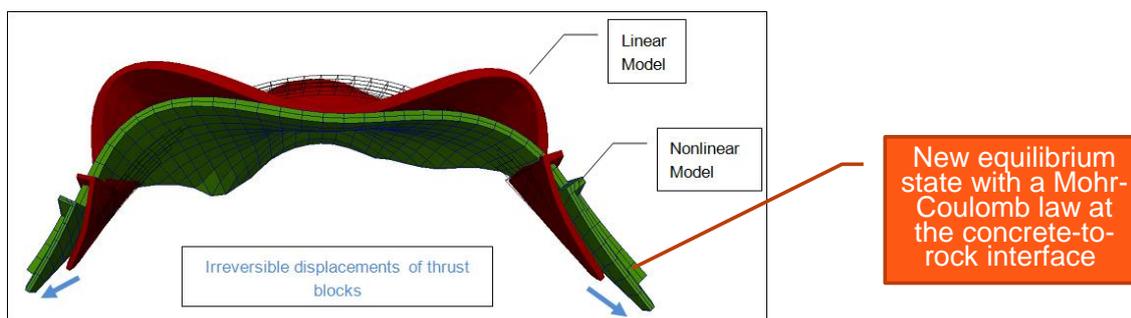


Figure 5 : Exemple de modélisations linéaire puis non-linéaire avec éléments-joints au contact

5. CONCLUSION

En 2018, le CFBR a publié les recommandations provisoires pour la justification du comportement des barrages voûtes. Ces recommandations proposent d'évaluer le comportement des ouvrages vis-à-vis de mécanismes de rupture potentiels déterminés à partir de l'accidentologie, de l'incidentologie et de l'extrapolation des résultats de modélisation. Parmi les mécanismes considérés, les mécanismes de glissement le long des appuis et de non-reprise des efforts en pied des plots centraux de la voûte sont en particulier analysés. Cependant, en première approche, il a été convenu de ne pas définir de critère chiffré sur le coefficient de sécurité ou le taux de sollicitation associé à ces mécanismes.

EDF a mené de nombreuses études de comportement de barrages-voûtes sur son parc hydraulique. L'article revient ainsi dans un premier temps sur les calculs de conception de ces voûtes et dans un second temps donne les taux de sollicitation obtenus (en termes de cohésions mobilisées) sur 9 des barrages-voûtes étudiés ces dernières années. Il en ressort que pour les situations usuellement étudiées la cohésion mobilisée est au moins supérieure à 0,2 MPa (sur au moins l'un des plots de l'ouvrage) et peut dépasser 1 MPa pour certains cas de charge et notamment en cas de pathologie de gonflement des bétons. Pour autant, sur l'ensemble des 9 barrages-voûtes présentés, aucun déplacement irréversible au contact barrage-fondation sous l'effet d'un éventuel cisaillement du pied n'a été identifié malgré un suivi constant depuis la mise en eau.

REMERCIEMENTS

Merci à Pauline Bofetty, Nicolas Humbert, Romain Tajetti, Etienne Grimal et Julie Fouqué pour le partage des résultats obtenus sur certaines de leurs études. Spéciale dédicace à Willy Tsopmo Keumedjio pour le laborieux travail de compilation des données.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Recommandations provisoires pour la justification du comportement des barrages-voûtes.
- [2] G. Coubard, J. Sausse – Swelling Arch Dams with Thrust Blocks – Swelling Concrete in Dams and Hydraulic Structures – 2017
- [3] Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects – chapter 11 – arch dams, FERC, 2018