

RESOLUTION DE PROBLEMES DE VIBRATIONS SUR DES VANNES SEGMENT

Solving vibration problems on segment gates

Jérôme MAUREAU ; Jean-Philippe TEISSIER

EDF CIH GN 266 Chemin de l'Étang 38950 St Marton Le Vinoux

EDF CIH TL 4 rue Claude Marie Perroud 31100 Toulouse

jerome.maureau@edf.fr ; jean-philippe.teissier@edf.fr

MOTS CLEFS

Vanne segment avec ou sans clapet, vibrations, aération, étanchéité

KEY WORDS

Radial Gate with or without flap, vibrations, aeration, seal

RÉSUMÉ

Présentation de la résolution de divers phénomènes de vibrations rencontrés récemment sur des vannes segment surmontées ou non d'un clapet déversant

ABSTRACT

Presentation of the resolution of various vibration phenomena encountered recently on radial gates with or without a flap gate.

1. INTRODUCTION

L'article présente la résolution de problèmes vibratoires rencontrés lors de la mise en service des vannes segment sur les barrages de La Gentille et de la Vanelle.

2. BARRAGE DE LA GENTILLE

2.1. Présentation de l'aménagement

L'usine de la Gentille turbine au fil de l'eau les eaux dérivées de la Garonne par le barrage de Miramont (Haute-Garonne). La prise d'eau de l'usine se fait à partir d'un plan de grilles suivi de trois vannes de tête et d'une vanne by-pass en rive droite.

La vanne by-pass, régule le niveau du canal et s'ouvre en cas de déclenchement d'un (des) groupe(s) de l'usine.

La vanne est de type segment (dimensions largeur x hauteur : 5156 mm de large x 1835 mm).

2.2. Les faits

La vanne a été rénovée en 2018. Les travaux ont consisté en :

- La mise en place d'une nouvelle commande par deux vérins oléohydrauliques (1 RG et 1 RD) avec leur centrale oléohydraulique, et la suppression des flotteurs et du contrepoids aval (figure 1). L'ouverture de la vanne est réalisée par l'alimentation, côté tige des vérins de commande, la fermeture est réalisée de façon gravitaire (mise à l'échappement des vérins de commande). Le remplacement de la poutre sur laquelle se reprend les vérins est aussi inclus (mise en place d'une poutre caissonnée boulonnée) ;
- Le remplacement des étanchéités. Les étanchéités de seuil et latérales ont été remplacées à l'identique car celles-ci donnent satisfaction. L'étanchéité frontale a été remplacée (figures 2 et 3) par un joint type cornière car la conception d'origine n'était pas satisfaisante et ce type de joint est plus facile à régler lors du montage sur site, compte-tenu des géométries de la vanne et des pièces fixes en vis-à-vis.

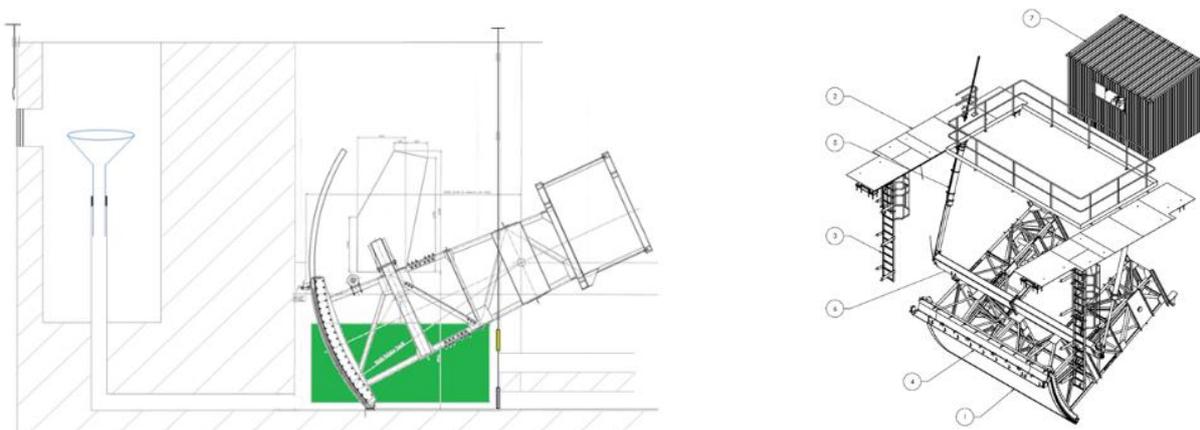


Figure 1 : Gentille - vanne by-pass commande avant travaux (gauche) et après travaux (droite)

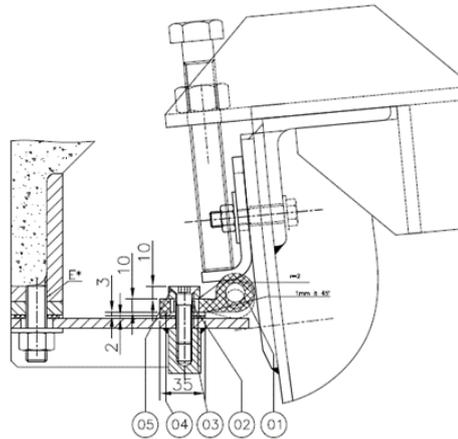


Figure 2 : Gentille - vanne by-pass – étanchéité de frontale – avant travaux 2018

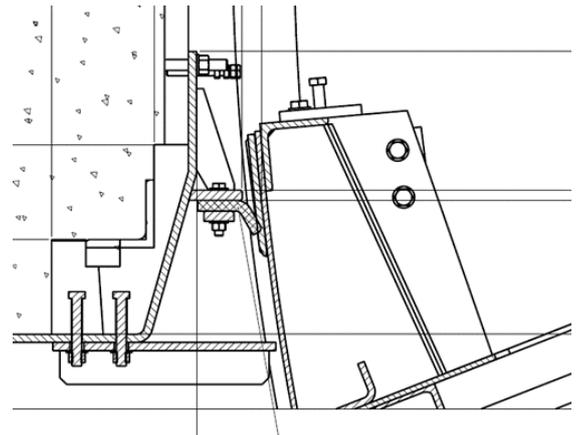


Figure 3 : Gentille - vanne by-pass – étanchéité de frontale – après travaux 2018

A la suite de sa mise en service (novembre 2018), la vanne présente des niveaux vibratoires importants.

En juillet 2019 une campagne de mesures par le service spécialisé EDF/DTG/CMS a été organisée pour évaluer les niveaux vibratoires réels de la vanne (25 points de mesures). Les résultats sont les suivants :

- Les vibrations sont très élevées dans le sens AM/AV sur le tablier : 20 mm/s_{eff} à 4% d'ouverture puis à 12% et 15% d'ouverture ;
- Les vibrations sont très élevées dans le sens AM/AV sur la poutre de liaison des vérins (en son centre) : 40 mm/s_{eff} à 28% et 40% d'ouverture :
- Les vibrations mesurées sur les autres points de mesures sont inférieures à 10 mm/s_{eff} (inférieure à valeur de référence maximale de 12 mm/s_{eff}) ;
- Au-delà de 60% d'ouverture, le niveau vibratoire est inférieur à 1 mm/s_{eff} sur l'ensemble des points de mesure. A noter que, lorsque la vanne est ouverte entre 1% et 59%, l'eau passe au-dessus (surverse) et en dessous (sousverse) de la vanne (cf. figure 4) et qu'à partir de 60% d'ouverture, l'eau ne passe plus qu'en dessous de la vanne.



Figure 4 - vanne by-pass en cours d'ouverture

2.3. Les conséquences

Après la campagne de mesures, il est préconisé de ne pas utiliser la vanne entre 2% et 50% d'ouverture car les niveaux vibratoires sont jugés trop élevés (risque d'endommagement de la structure par fatigue).

La vanne étant nécessaire à l'exploitation, la décision de la maîtrise d'ouvrage est de laisser la vanne en service avec la mise en place d'un Dispositif et Moyen Particulier (DMP), en attendant de résoudre le problème vibratoire. Le DMP consiste en une visite de la vanne tous les deux mois pour contrôler l'état des soudures, des boulonneries, des ancrages (fixation châssis support vérins), des paliers tourillons, et de la commande oléohydraulique.

Lors de ces différents contrôles, aucune dégradation (depuis la mise en service fin 2018) n'a été constatée du fait des vibrations.

2.4. Les causes possibles identifiées

Plusieurs causes, aussi bien côté source d'excitation que côté réponse de la structure à une excitation, ont été envisagées pour expliquer ces vibrations anormales et inacceptables :

1. Les tôles de protection du joint frontal, trop élancées, peuvent entrer en vibration et venir exciter la structure de la vanne ;
2. La dépose du contrepoids a rendu plus souple la structure de la vanne : à l'origine la structure travaillait « en cadre » et suite à la suppression du contrepoids la structure travaille « en portique ». Elle est donc plus souple et sollicite d'avantage et de manière différente les paliers des tourillons ;
3. L'étanchéité de seuil peut être la source d'excitation de la vanne ;
4. L'étanchéité frontale peut être la source d'excitation de la vanne ;
5. La vanne répond sur ses modes propres à l'excitation hydraulique (lame d'eau sur la vanne).

NOTA : les causes ont été classées par ordre de facilité d'intervention sur site (optimisation du temps d'indisponibilité de la vanne).

2.5. Les actions curatives (plan d'actions)

La décision a été prise de traiter le problème « pas à pas », en intervenant méthodiquement sur les cinq causes possibles identifiées précédemment.

2.5.1 Les tôles de protection du joint frontal – Décembre 2019

- Dépose des tôles de protection (figure 5);
 - Essais : les niveaux vibratoires mesurés ont augmenté jusqu'à 75 mm/s dans le sens AM/AV au centre de la poutre, à 34% d'ouverture ;
 - Décision : remise en place des tôles ;
 - Essais : les niveaux vibratoires sont revenus comme avant intervention (≈ 40 mm/s dans le sens AM/AV au centre de la poutre).
- ➔ Essais non concluants : les tôles de protection du joint frontal ne sont pas la source d'excitation de la vanne.



Figure 5 : étanchéité frontale

2.5.2. La dépose du contrepoids a rendu plus souple la vanne : effet portique – Décembre 2019

- Une étude modale a été réalisée. Les conclusions sont que la dépose du contrepoids induit une diminution des masses mais également de la raideur dans les bras → apparition de modes liés à la structure treillis des bras ;
 - Solution : Mise en place de deux HEB 300 en lieu et place du contrepoids d'origine (figure 6) pour refermer le cadre de la structure de la vanne et retrouver la rigidité d'origine de la vanne. Vérification que les nouveaux efforts de manœuvre restent compatibles avec les nouveaux actionneurs ;
 - Essais : les niveaux vibratoires ont diminué : 34 mm/s dans le sens AM/AV au centre de la poutre à 32% d'ouverture.
- ➔ La fermeture du cadre de la structure a permis de retrouver une rigidité de structure se rapprochant de celle d'origine, bien que le contrepoids ait été enlevé : essais concluants mais pas entièrement satisfaisants car les niveaux vibratoires restent toujours trop élevés.

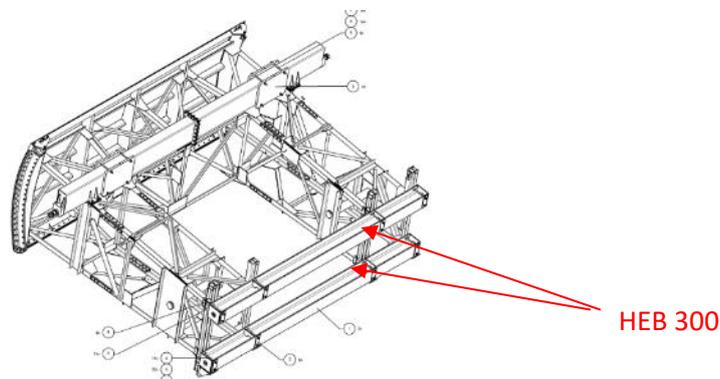


Figure 6 : Gentille - vanne by-pass – HEB 300

2.5.3. Etanchéité de seuil – Février 2020

- Dépose de l'étanchéité de seuil ;
 - Essais : les niveaux vibratoires avec et sans l'étanchéité de seuil sont identiques ;
 - Repose de l'étanchéité.
- ➔ Essais non concluants : l'étanchéité de seuil n'est pas la source d'excitation de la vanne.

2.5.4. Etanchéité frontale – Septembre 2020

- Modification de la conception de l'étanchéité de frontale : mise en place d'un joint oméga ou « joint note de musique double queue » (figure 7). Ce type de joint est plus classique dans ce type de configuration et présente l'avantage d'être mieux tenu. En revanche, il est plus difficile à mettre en place et à régler ;

- Essais : les niveaux vibratoires mesurés sont inférieurs à 2 mm/s sur la plage de 0 à 50% d'ouverture.
- ➔ La modification de la conception de l'étanchéité frontale a permis d'annuler la source d'excitation. Les niveaux vibratoires maximum mesurés hors régimes transitoires sont de l'ordre de 1,5 mm/seff. La fréquence propre de la structure aux alentours de 22 Hz est toujours présente mais n'est plus excitée par l'étanchéité frontale. La conception de la vanne et en particulier ses modes propres restent inchangés : **Essais concluants.**

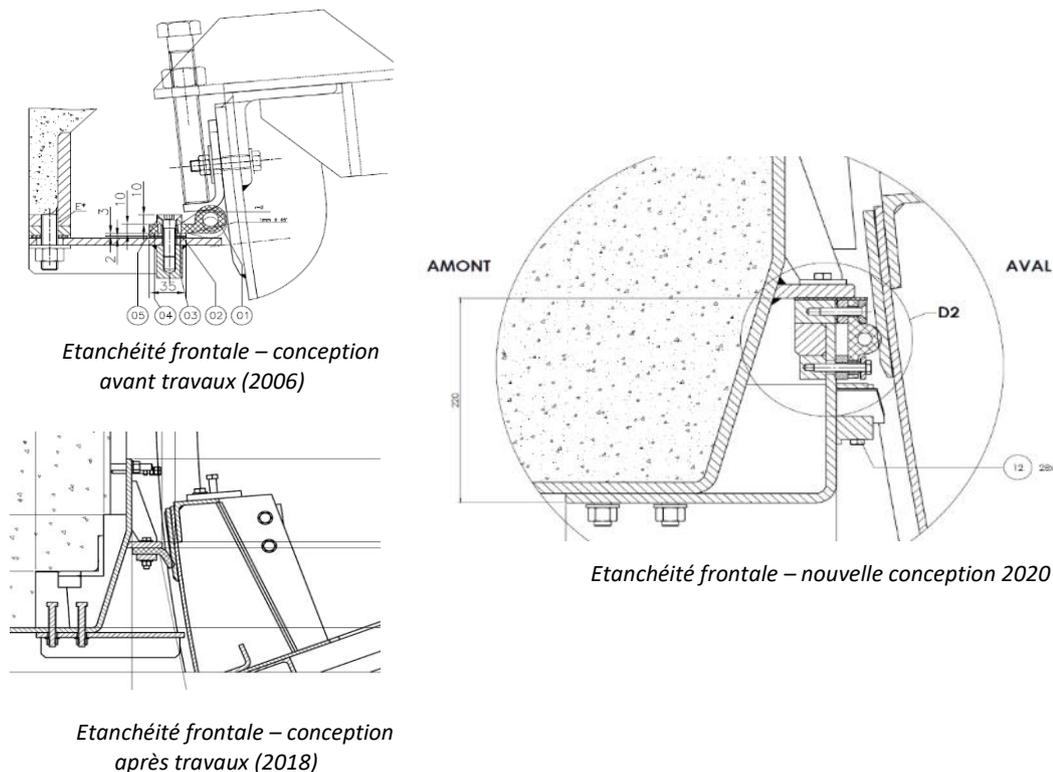


Figure 7 : Etanchéité frontale – modification de conception

NOTA : dans la « nouvelle conception 2020 », il était prévu de mettre en place un deuxième joint frontal, avec frottement permanent sur le bordé amont (cf figure 8)). Son rôle : empêcher l'eau de couler en partie supérieure de la vanne, via la frontale (cause n°5). Compte tenu des résultats favorables des essais sans ce joint « brise-jet » (niveau vibratoire acceptable, étanchéité de la vanne conforme aux attendus), il a été décidé de ne pas le mettre en place.

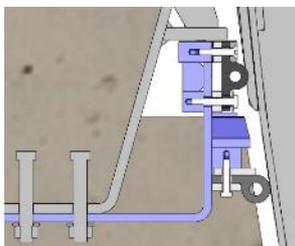


Figure 8 : brise – jet : non monté

3. BARRAGE DE LA VANELLE

3.1. Contexte

Le barrage de La Vanelle, mis en service en 1950, est situé sur l'Isère et à l'aval de la ville de Romans-sur-Isère (Drôme). L'évacuateur de crues est équipé de 4 vannes segment (figure 9), surmontées d'un clapet déversant, qui ferment des passes de 18,00 m de large par 10,30 m de hauteur.

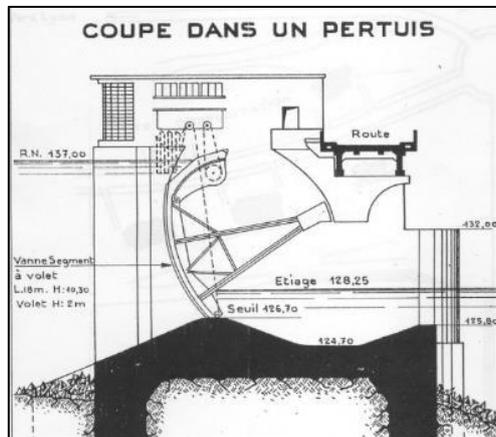


Figure 9 - Coupe dans un pertuis

Les vannes et les clapets sont manœuvrés chacun par des treuils indépendants, à chaînes Galle. Dans le cadre du remplacement des vannes, les nouvelles vannes (figure 10) sont constituées de 4 éléments principaux réalisés par mécano-soudage :

- Le caisson inférieur,
- Le caisson supérieur,
- Le clapet déversant,
- Les bras.

Les deux caissons sont reliés entre eux par des éclisses boulonnées. Le caisson supérieur porte, quant à lui, les sept axes d'articulation du clapet, ainsi que les deux bajoyers réalisant la portée d'étanchéité des joints latéraux du clapet. Les bras sont assemblés sur les caissons à l'aide de platines boulonnées.

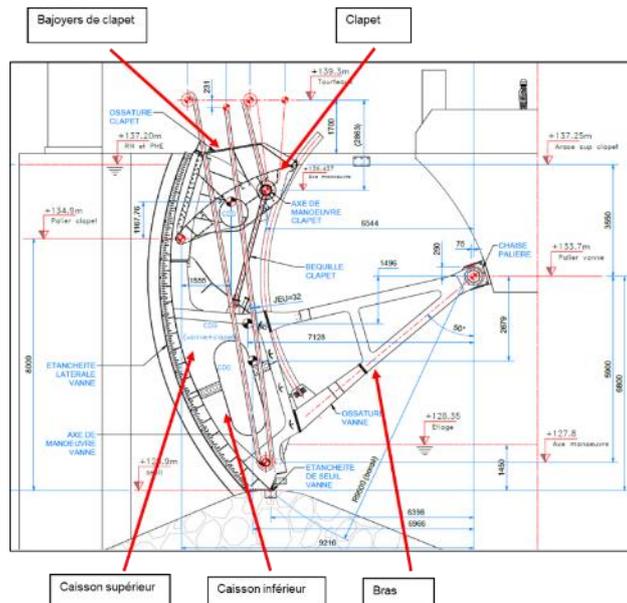


Figure 10 - Coupe des nouvelles vannes

Lors des essais de requalification en eaux vives de la vanne n°4, en septembre 2019, des vibrations ont été constatées à l'ouverture du clapet et à l'ouverture de la vanne. Des investigations ont été menées pour déterminer l'origine de ces vibrations et pour apporter les modifications de conception permettant de les résoudre.

3.2. Les vibrations du clapet

3.2.1. Constats aux premiers essais en eaux vives

Les enregistrements des efforts aux chaînes Galle lors des premiers essais sont présentés sur la figure 11.

Les deux courbes montrent une phase vibratoire en début d'ouverture du clapet, enregistrée sur chacune des chaînes Galle de manœuvre. L'analyse fréquentielle du signal enregistré met en évidence une fréquence de l'ordre de 5 Hz, avec une amplitude maximale de l'ordre de 20% de l'effort nominal pour chacune des chaînes.

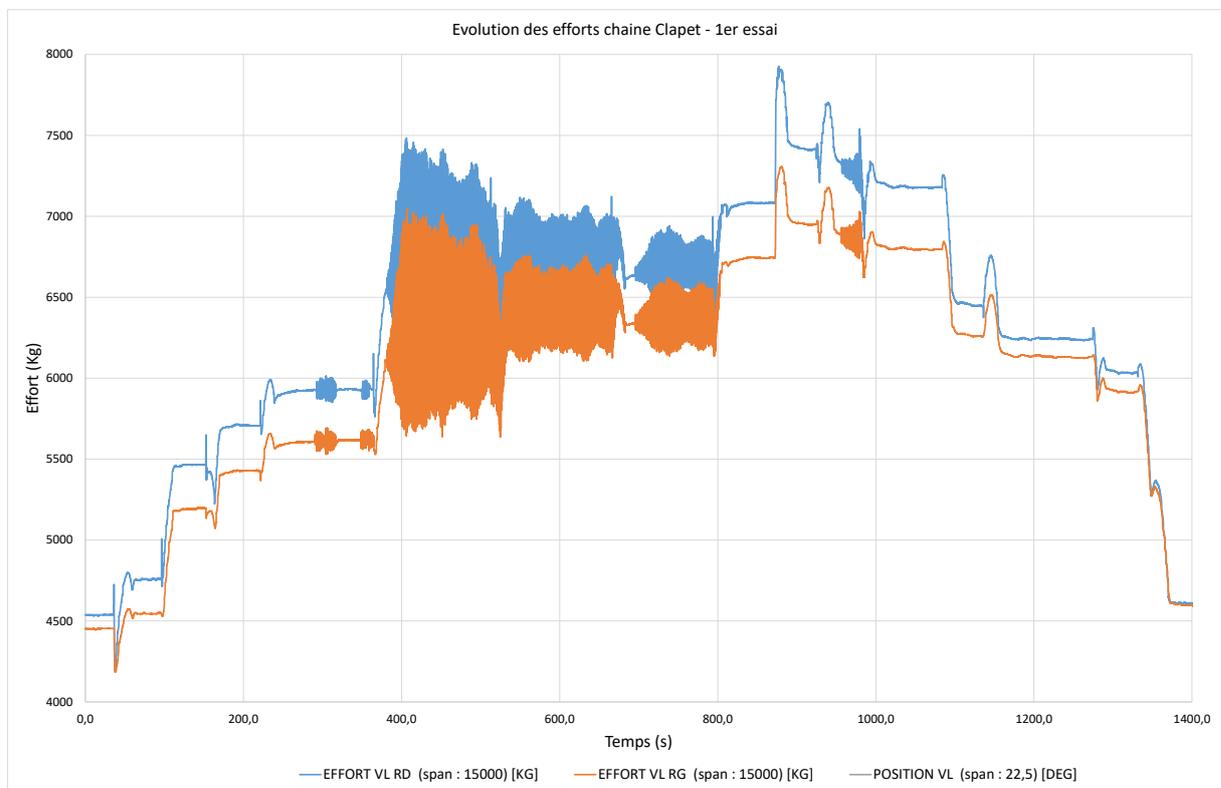


Figure 11 - Enregistrement des vibrations sur le clapet

Lors de ces essais, il est constaté que la lame d'eau, en sortie de clapet, couvre toute la largeur de la passe : Elle vient impacter les bras, ainsi que les murs latéraux de la passe (figure 12), et constitue un « rideau d'eau étanche » qui empêche toute aération en sous face de la lame d'eau déversante.



Figure 12 - Arrosage des bras de vanne par la lame déversante

3.2.2. Origine des vibrations sur les clapets déversants

Les problèmes vibratoires rencontrés sur les clapets déversants sont généralement liés à un manque d'aération en sous-face de la lame d'eau :

- Le débit d'eau entraîne l'air présent sous le clapet, créant une dépression ayant tendance à « tirer » le clapet vers le bas,
- Lorsque cette dépression est suffisante, de l'air en provenance de l'aval vient alimenter le volume d'air en sous-face, ce qui augmente le niveau de pression et diminue cet effort de traction.

Ce problème est généralement résolu en facilitant l'alimentation en air en sous-face de la lame d'eau : en ajoutant des brises lames sur la crête du clapet, de manière à « déchirer » le film d'eau aux faibles ouvertures du clapet, et davantage diriger la lame d'eau déversante vers le centre de la passe, de manière à éviter l'arrosage continu des bras de vanne et favoriser l'aération de la nappe d'eau aux grandes ouvertures par les côtés.

3.2.3. Modifications apportées et résultats obtenus

Les éléments bibliographiques et le retour d'expérience disponible au CIH, ainsi que la comparaison de la nouvelle conception avec la conception initiale ont orienté les choix vers l'installation de déflecteurs latéraux permettant de recentrer la lame d'eau vers le centre de la passe, et vers la mise en place de becs de fractionnement plus haut que ceux prévus initialement. Ces modifications ont permis de supprimer la phase vibratoire sur les enregistrements d'efforts, en figure 13. Les efforts de manœuvre du clapet sont revenus aux valeurs attendues.

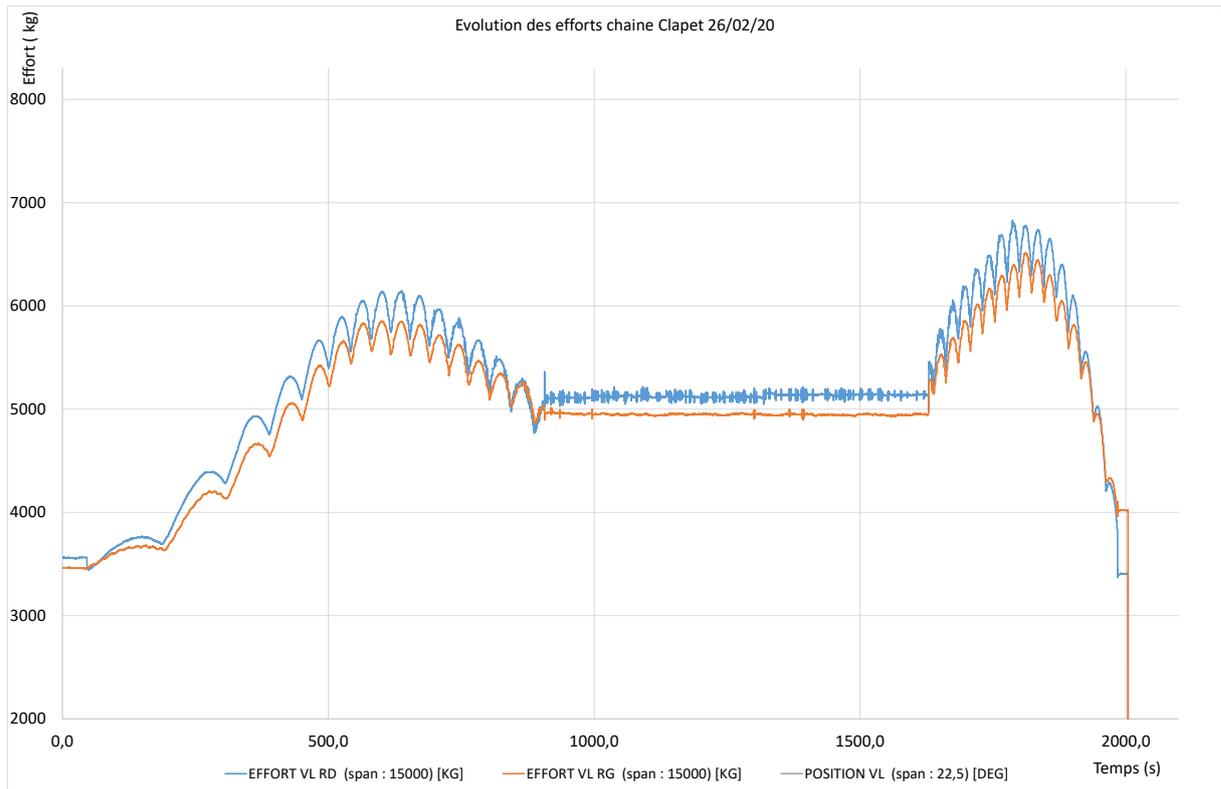


Figure 13 – Enregistrements des efforts après modification

3.3. Les vibrations de la vanne segment

3.3.1. Constats aux premiers essais

Lors des premiers essais d'ouverture de la vanne segment en charge, une mise en vibration du plan d'eau amont a été observée. Ces vibrations sont visibles sur la figure 14 (irisation du plan d'eau).

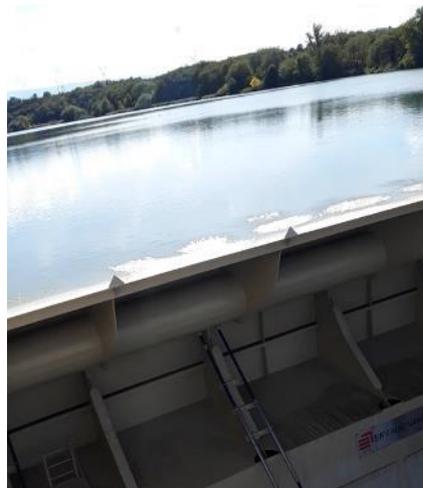


Figure 14 – Vibrations du plan d'eau

Les phénomènes vibratoires étaient aussi audibles de manière intense. Les essais ont été interrompus afin d'analyser les causes possibles et les corriger.

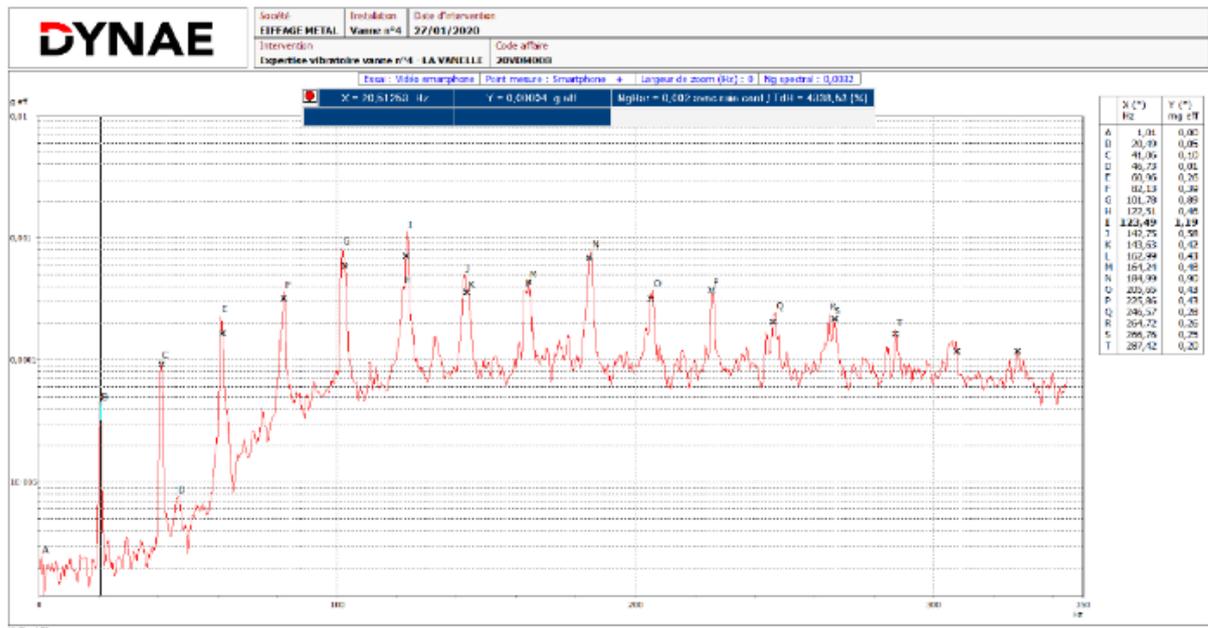


Figure 15 – Analyse spectrale des enregistrements sonores

L'analyse spectrale des enregistrements sonores (figure 15) des essais ont permis d'identifier l'apparition d'un phénomène vibratoire vers la fréquence de 20 Hz, avec des harmoniques jusqu'à 400 Hz environ.

3.3.2. Recherches bibliographiques et analyse du retour d'expérience

Quelques cas de vibrations de vannes segments en début d'ouverture ont déjà été observés sur le parc hydraulique exploité par EDF Hydro, ainsi qu'à l'international. Ils sont toutefois moins fréquents que les problèmes vibratoires de vannes déversantes comme traités au paragraphe précédent.

Les principales publications

Lewin présente quelques causes de vibrations observées sur les vannes des aménagements hydrauliques. Les causes pouvant s'appliquer à la conception des nouvelles vannes du barrage de La Vanelle sont détaillées ci-dessous :

- Fuites aux joints latéraux pouvant créer une pulsation de la pression amont, entraînant une mise en vibration de la structure,
- Conception du joint de seuil permettant un déplacement du point de contrôle de l'écoulement,
- Fuites au joint de seuil, pouvant notamment être la conséquence d'un mauvais serrage du presse-joint.

Aucune fuite notable n'ayant été constatée lors des essais d'étanchéité, les recherches se sont orientées vers le 2^{ème} point. Sur ce sujet, Lewin donne les préconisations suivantes :

« Le joint doit permettre de réaliser une séparation nette de la veine d'eau sous la vanne. Un joint note de musique n'est donc pas adapté, et seul le joint plat est recommandé. Dans les deux cas, l'écoulement peut se rattacher à la structure, et si ce phénomène se produit de manière intermittente et régulière, une vibration de vanne peut apparaître ».

La CIGB a également proposé des éléments de réflexion dans leur bulletin de 1996 [2]. Les éléments obtenus sont de deux ordres :

- D'un point de vue structurel, la stabilité des vannes segment s'obtient en veillant :
 - A une coïncidence parfaite entre le centre du bordé et l'axe de rotation des bras,

- À une déformation minime de la structure sous charge hydrostatique afin de garantir la stabilité du point de centre du bordé, et notamment l'absence de déplacement de ce point sous l'axe de rotation. En effet, dans cette situation, une tendance hydraulique à la fermeture de la vanne s'ajoute au bilan de manœuvre de la vanne. Cette tendance hydraulique peut occasionner de nouveau une fermeture partielle ou totale, conduisant donc à une pulsation de débit et donc de pression. Ces pulsations peuvent être à l'origine d'un phénomène vibratoire. Ce phénomène a été à l'origine d'une rupture de vanne par flambement de son bras inférieur.
- D'un point de vue conception, des essais sur modèle ont été menés pour différentes dispositions des étanchéités de seuil.

Les différentes propositions de Lewin et du bulletin de la CIGB sont présentées en figure 16.

LEWIN	CIGB
<p>(a) : montage avec joint aval, recommandé. L'écoulement est net jusqu'au point de contrôle</p> <p>(b) : montage avec joint amont. L'écoulement est perturbé par l'arête formée entre la butée arrière du joint et le presse joint.</p> <p>(c) : montage avec note de musique aval, provoquant une instabilité du point de contrôle de l'écoulement. Par ailleurs, lors de la manœuvre, le porte-joint tend à devenir horizontal, ce qui expose le joint à l'écoulement, et augmente la surface de contrôle de l'écoulement.</p> <p>(d) : montage avec note de musique amont, provoquant une instabilité du point de contrôle, et une perturbation de l'écoulement par les pièces de montage du joint. Lors de la manœuvre de la vanne, le couteau devient le point de contrôle, ce qui augmente encore l'instabilité.</p>	<p>Conclusions des essais réalisés sur modèle réduits, puis sur prototype :</p> <p>(a) Les cas A₁, B₁ conduisent à l'apparition de vibration en raison de la « création » d'une fente oscillante.</p> <p>(b) Le cas C₁ conduit également à des phénomènes vibratoires en raison d'une rigidité insuffisante de la fixation. Le déplacement du joint plat est ici à l'origine de la fente oscillante.</p> <p>(c) A₂ est à proscrire en raison de la zone de dépression à l'aval du joint</p> <p>(d) L'emploi d'arêtes vives supprime les vibrations (A₃, B₂, B₃, C₂)</p> <p>(e) Les configurations A₃ et B₃ ont été testées avec succès sur les modèles puis sur les prototypes.</p>

Figure 16 - Conclusions des études bibliographiques

Les retours d'expériences en France et à l'international

Quelques retours d'expériences favorables ont montré qu'une action sur le joint de seuil limiterait ou supprimerait les vibrations des vannes segment.

3.3.3. Application à la conception de la vanne de La Vanelle

La conception du couteau de la vanne est présentée sur l'extrait de plan ci-dessous.

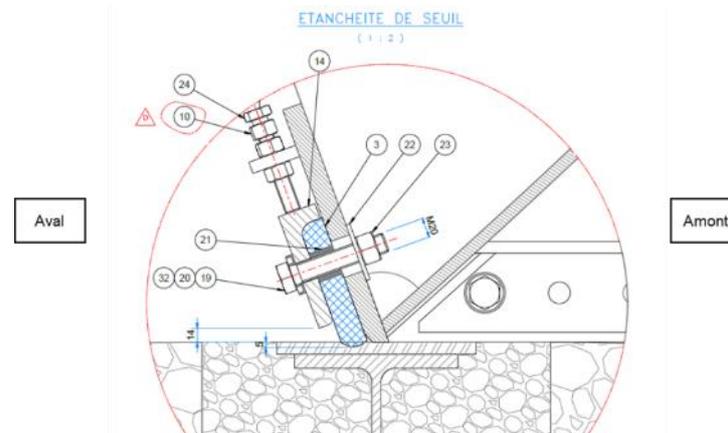


Figure 17 - Conception initiale du joint de seuil

Les préconisations de Lewin semblent respectées, mais néanmoins, une similarité avec la configuration C1 du CIGB est observée.

Une détermination des fréquences propres de la structure de la vanne a été réalisée dans un premier temps. Elle met en évidence une fréquence propre aux environs de 20 Hz.

Puis il est donc décidé de modifier le presse-joint, de manière à rigidifier la liaison du joint sur le couteau en partie inférieure en diminuant le jeu entre la pièce fixe et le presse joint de 14 mm à 3 mm.

Cette modification a été testée avec succès lors d'un essai d'ouverture en charge de la vanne. Cet essai a été réalisé avec une instrumentation permettant de surveiller l'apparition de phénomènes vibratoires :

- Installation d'accéléromètres sur la vanne et le clapet,
- Mesure des fréquences propres de la vanne et du clapet.

L'analyse des enregistrements montre un phénomène vibratoire, plus important en début de manœuvre, principalement suivant les directions « Rive à Rive » et « verticale », avec une 1^{ère} fréquence à 20,8 Hz. Ce phénomène a également été détecté par le microphone des enregistrements réalisés lors de ces essais. La concordance entre cette fréquence et une fréquence propre de la structure de la vanne explique les phénomènes vibratoires qui ont été constatés.

La meilleure tenue du joint a permis de limiter fortement l'amplitude des phénomènes vibratoires qui deviennent imperceptibles en phase d'exploitation.

4. CONCLUSION

Les phénomènes vibratoires des vannes charpentées restent des problématiques complexes qui peuvent trouver leur origine dans des interactions fluide-structure. Les étanchéités mal tenues et une mauvaise aération des écoulements en sont souvent à l'origine, lorsque les vannes sont suffisamment rigides. Afin d'éviter les mauvaises expériences, il est nécessaire :

- Pour les écoulements en surverse :
 - d'aérer convenablement la lame d'eau aux faibles ouvertures à l'aide de becs de fractionnement et de puits d'aération latéraux,
 - de considérer néanmoins le risque de blocage d'embâcles dans la conception et le positionnement des becs de fractionnement,
 - de prévoir une aération latérale suffisante pour les plus grandes ouvertures, en recentrant la lame d'eau vers le centre de la passe et/ou en ajoutant des dispositifs d'admission d'air dans les bajoyers génie-civil,

- Pour les écoulements en sous-verse :
 - de préférer les assemblages rigides au niveau des joints,
 - d'éviter l'installation de joints souples (type cornière) si ceux-ci ne sont pas en contact permanent avec la structure,
 - de concevoir les vannes avec une position nette du point de contrôle de l'écoulement (il est souvent fait mention de « couteau » de vanne pour ces parties inférieures contrôlant le débit),
 - de limiter les perturbations de l'écoulement en amont de ce point de contrôle,
 - de veiller à la coïncidence du centre de courbure d'une vanne segment et de son axe de rotation afin d'améliorer la stabilité de la vanne,
 - de dimensionner la structure de la vanne afin qu'elle présente une rigidité suffisante et éviter ainsi des déformations des longrines et que le point d'application des charges passe en dessous de l'axe de rotation.

REMERCIEMENTS

Les résultats sur ces deux affaires sont le fruit d'une étroite collaboration entre les entreprises de travaux et les différents services d'EDF CIH, d'EDF DTG, d'EDF Hydro Alpes et d'EDF Hydro Sud-Ouest.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Spillway gate design features which can cause vibrations - Jack Lewin, 2008.
- [2] Bulletin de 1996 de la CIGB sur la vibration du matériel hydraulique des barrages (B102).
- [3] Description of some seal vibration problems at hydraulic gates on German waterways, 2018.
- [4] Numerical simulation of flow induced vibration on gates with underflow, 2019.