

## ETUDE DE LA CAPACITE DE COUPURE DU DEBIT DES VANNES AVAL DES GROUPES BULBE DU RHÔNE

### *Discharge cut-off capacity analysis of the downstream gates of the Rhône bulb units*

**Boris HAVARD, Théophile FOGGIA, Eliette LEBRUN**

CNR, 2 rue Bonin 69004 Lyon

[b.havard@cnr.tm.fr](mailto:b.havard@cnr.tm.fr) ; [t.foggia@cnr.tm.fr](mailto:t.foggia@cnr.tm.fr) ; [eliette-externe.lebrun@cnr.tm.fr](mailto:eliette-externe.lebrun@cnr.tm.fr)

**Pierre-Antoine CHAMBAS, Anne CUVILLIER**

GE Hydro, 82, Avenue Léon Blum – BP 75 | 38041

[pierre-antoine.chambas@ge.com](mailto:pierre-antoine.chambas@ge.com) ; [anne.cuvillier@ge.com](mailto:anne.cuvillier@ge.com)

## MOTS CLEFS

Vanne aval, Groupe bulbe, marche déchargeur, capacité de coupure de débit

## KEY WORDS

Downstream valve, bulb groups, sluice mode operation, discharge cut-off capacity

## RÉSUMÉ

*Les vannes aval des groupes bulbes assurent la sécurité des groupes (barrière de sécurité vis-à-vis de l'emballement des groupes) et participent à la sûreté de l'aménagement (marche en déchargeur, passage de la crue). Elles requièrent donc un haut niveau de fiabilité.*

*Les vannes aval sont à fermeture gravitaire. L'usure des organes de roulement et des rails de roulement dégrade leur capacité de fermeture gravitaire.*

*Pour les groupes réglant équipés d'un vannage, l'évaluation des efforts de manœuvre des vannes aval par la mesure des pressions de chaque vérin lors de manœuvres normales ne suffit pas à vérifier la capacité de manœuvre ultime des vannes aval (coupure de l'emballement sans participation du vannage).*

*La méthode exposée dans cet article propose de créer un modèle analytique afin d'établir, de façon préventive et en fonction de leur usure, la capacité de coupure résiduelle et le niveau de réhabilitation nécessaire pour garantir la fiabilité des vannes aval.*

## ABSTRACT

*The downstream gates of the bulb units ensure the safety of the units (safety barrier against unit runaway) and contribute to the safety of the power plant (sluice mode operation, flood passage). They therefore require a high level of reliability.*

*The downstream gates are gravity-operated. Wear on the main rollers and rails reduce their capacity for gravity cut-off.*

*For regulating groups equipped with a adjustable guide vanes, evaluating the dwonstream gates operating forces by measuring the operating pressures of the downstream valves during normal closing is not enough to check their ultimate operating capacity (runaway discharge cut-off while guide guide vanes inoperating).*

*The methodology described in this paper suggests to use an analytical modeling to establish, on a preventive basis and as a function of wear, their residual discharge cut-off capacity and the level of rehabilitation required to guarantee downstream gatesreliability.*

## 1. PRESENTATION DES AMENAGEMENTS DU RHONE EQUIPES DE GROUPES BULBE

Les usines hydroélectriques de la CNR sont exploitées au fils de l'eau (hormis celle de Génissiat). Elles sont équipées de 2 à 6 groupes en fonction du débit d'équipement de l'usine.

L'étude est menée uniquement pour les usines équipées de groupes bulbes.

Les groupes de production sont équipés :

- A l'amont : d'un panneau de grilles de prise d'eau, d'un dégrilleur (commun aux groupes) et d'une rainure amont à batardeau permettant la mise à sec du conduit
  - D'une turbine de type bulbe réglant (pales et vannage mobiles) ou fixe (vannage et pales fixes)
  - A l'aval : d'une vanne aval à coupure rapide individuelle par groupe.
- Les groupes ne sont pas équipés de rainure aval pour le batardage des groupes.

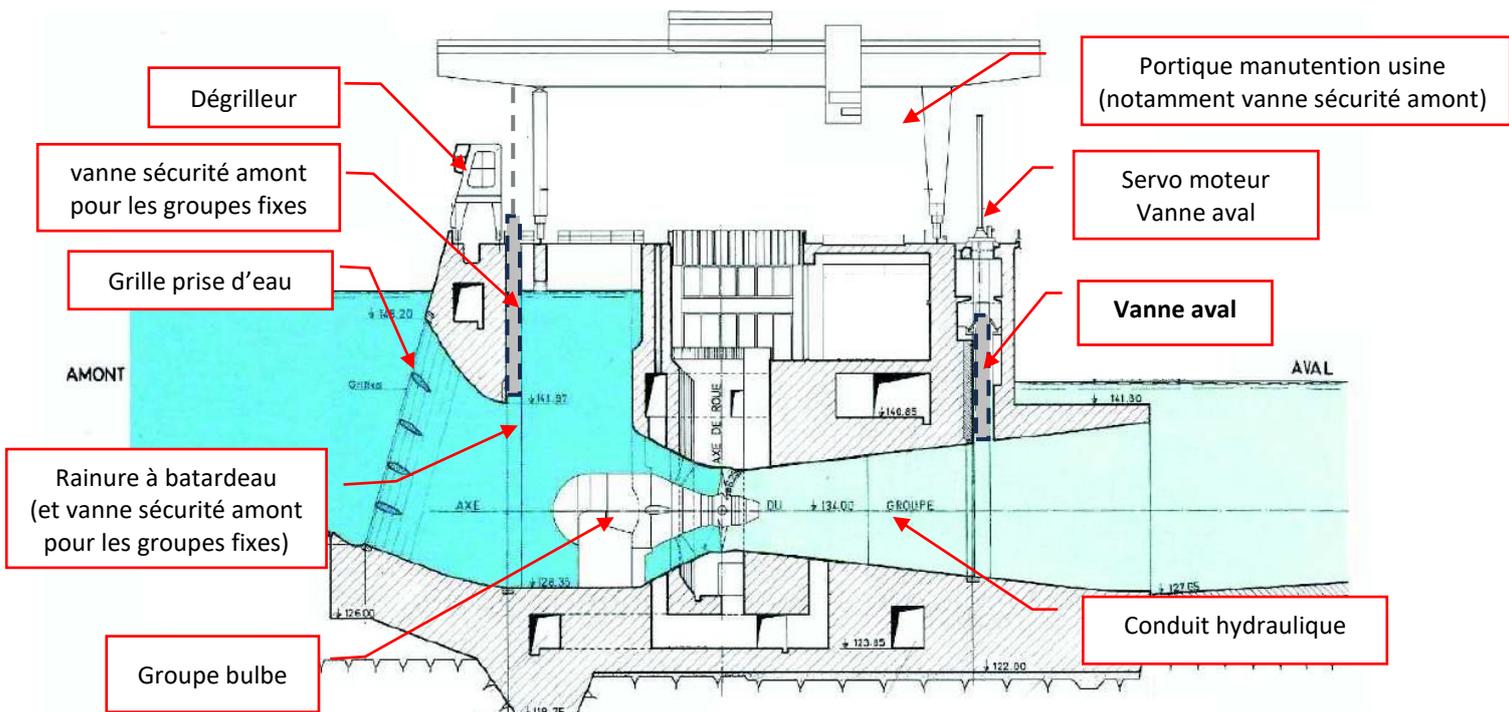


Figure 1 : Coupe longitudinale d'un groupe bulbe

### 1.1. Caractéristiques principales des groupes bulbes :

- Diamètre de roue : 6 250mm (groupes réglant) – 6 900mm (groupe fixes)
- Puissance : de 18 à 45 MW
- Chute brute : de 5.5 à 18.5 mCE
- Débit nominal : 400 m<sup>3</sup>/s

### 1.2. Caractéristiques principales des vannes aval :

- Dimensions principales : hauteur : 10.3m – largeur : 10.86m – épaisseur : 1.3m
- Poids : de 75 à 102t (en fonction du lest et de la chute)

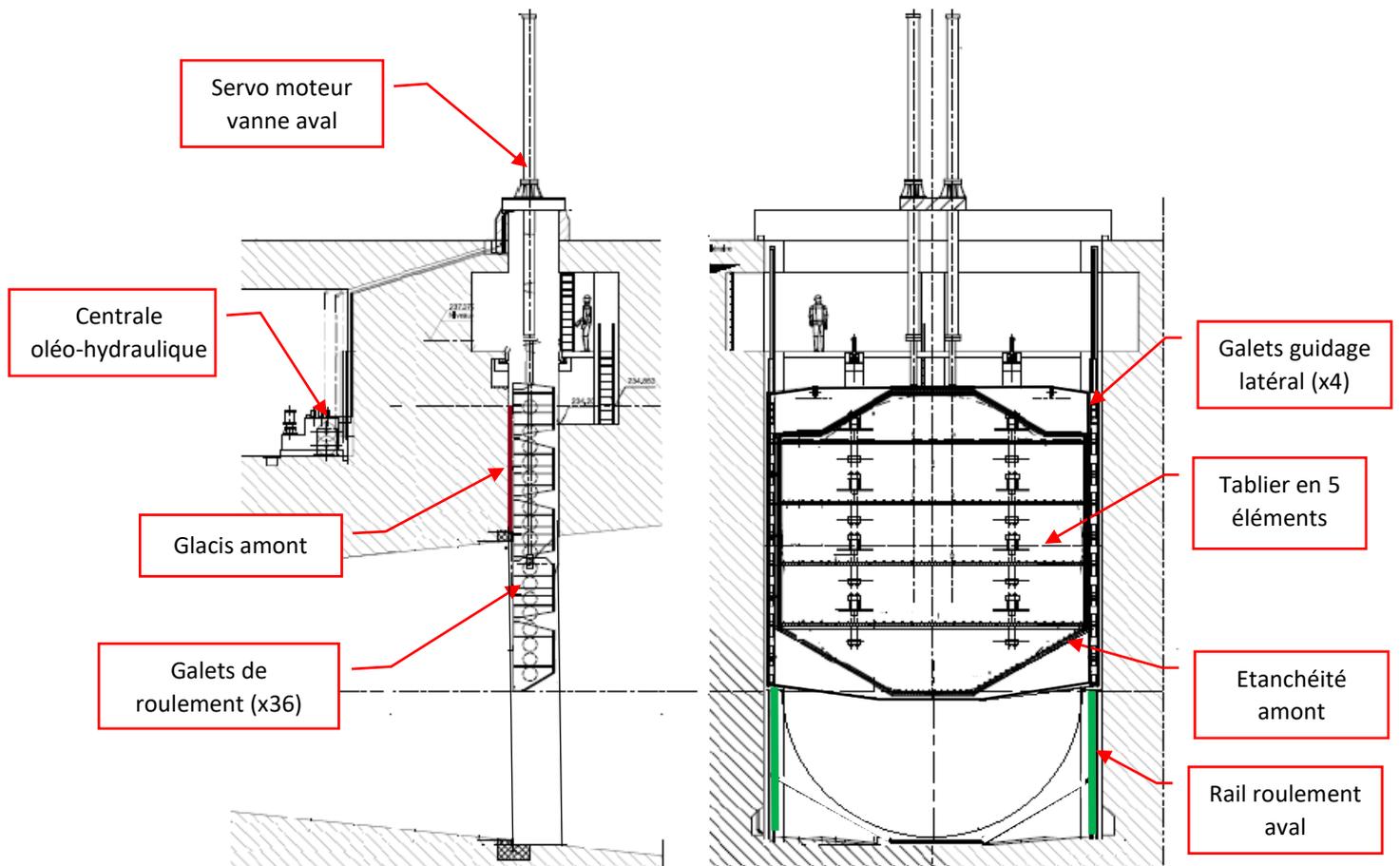


Figure 2 : Coupe d'une vanne aval

Les vannes aval sont à fermeture gravitaire : la coupure du débit se fait sans apport d'énergie.

Elles sont mues par 2 servomoteurs simple effet pour assurer leur montée et gérer la vitesse de descente (loi à 4 pentes).

Les vannes sont constituées d'un tablier en 5 éléments assemblés entre eux par des tirants.

Chaque élément de vanne est équipé de 2x4 galets de roulement (hormis l'élément supérieur qui n'est équipé que de 2x2 galets). Les galets de roulement d'origine sont des galets cylindriques en acier montés sur des paliers autolubrifiants (Fiberglide®).

Les éléments supérieur et inférieur sont équipés de 2 galets de guidage latéral.

Les galets roulent sur un rail situé à l'aval de type burbach en acier A60.

L'étanchéité est placée à l'amont de la vanne. La face amont de la rainure est équipée d'un enduit lisse sur une hauteur de 4 m au-dessus de la frontale (glacis amont) pour assurer l'étanchéité amont de la vanne sur toute sa course de réglage en marche déchargeur\*.

\* *marche déchargeur (MDCH) : fonctionnement particulier de la turbine découplée au réseau permettant de restituer environ deux tiers du débit nominal turbiné : la chute est dégradée par la vanne aval partiellement fermée.*

### 1.3.Fonctions de la vanne aval :

- Pour les groupes fixes, la vanne aval assure la fonction de réglage (démarrage, prise de charge et arrêt du groupe).  
Dans cette configuration, la vanne aval est redondée par une vanne de coupure amont pour sa fonction de sécurité (coupure emballement).

Pour les groupes réglant, c'est le vannage qui assure la fonction de réglage et de coupure.

- La vanne aval garantit la coupure du débit et l'arrêt du groupe en cas de défaut de sécurité (emballement turbine, arrêt d'urgence).  
C'est la barrière de sécurité du groupe. Elle doit couper la totalité du débit d'emballement du groupe quelles que soient les conditions d'exploitation (notamment en cas de dysfonctionnement du vannage pour les groupes réglant).
- En marche déchargeur, la vanne aval contrôle le débit restitué et la vitesse du groupe.  
La marche déchargeur permet la continuité du débit en cas d'un déclenchement usiné dû à la perte du réseau interconnecté. Pour certains aménagements, la marche déchargeur participe également au passage de la crue de projet.  
La vanne aval participe à la sûreté hydraulique de l'aménagement.
- Les groupes bulbes ne sont pas équipés de rainure aval pour la mise à sec du conduit hydraulique. C'est la vanne aval qui permet d'obturer l'aval du conduit du groupe pour la visite et l'entretien de la turbine.  
Le remplissage ultérieur du conduit se fait par l'amont en soulevant l'élément de batardeau supérieur.

#### 1.4. Condition d'exploitation des vannes aval :

Les vannes aval ne sont pas exploitées de la même façon suivant le type du groupe associé :

- Pour les groupes fixes, la vanne aval coupe systématiquement le débit en charge pour chaque arrêt du groupe (normal ou sur défaut).  
Nota : l'ouverture de la vanne aval se fait également en charge.  
  
Les manœuvres sont relativement fréquentes (de l'ordre de 100 coupures par an pour les groupes les plus sollicités) ; ces vannes aval sont très fortement sollicitées.
- Pour les groupes réglant, le vannage intervient systématiquement lors de la coupure du débit. La vanne aval ne voit donc qu'un débit et une charge partiels lors de sa coupure.  
Nota : l'ouverture de la vanne aval se fait systématiquement en eau morte (vannage fermé).  
  
Pour le bas Rhône (au sud de Lyon), la vanne aval ne se ferme pas sur un arrêt normal mais uniquement sur défaut. Les manœuvres de la vanne aval sont relativement rares (de l'ordre de quelques coupures par an) et à charge partielle ; ces vannes sont très peu sollicitées.  
  
Pour le haut Rhône (au nord de Lyon), la vanne aval se ferme systématiquement sur chaque arrêt. Les manœuvres de la vanne aval sont très fréquentes (1 à 2 fois par jour pour les groupes les plus sollicités) mais à charge partielle ; ces vannes sont relativement sollicitées.

## 2. REX DE LA CNR SUR L'EXPLOITATION DES VANNES AVAL

Dès 1979 et après 5 ans d'exploitation des groupes fixes, il a été observé les 1<sup>ers</sup> blocages des vannes aval.

A la suite d'expertises, il est alors constaté une forte dégradation des paliers autolubrifiants (Fiberglide®) des galets de roulement ainsi qu'une usure prématurée des rails de roulement aval (succession de creux et de bosses compris entre 1 et 3mm de profondeur au pas de 500mm en partie basse des rails).

Après une première campagne de remplacement des paliers autolubrifiants, les galets sont finalement remplacés entre 1993 et 2001 par des galets bombés en inox montés sur roulements afin de réduire les frottements de roulement.

Ce pas technologique permettra d'exploiter les vannes sans blocage jusque dans les années 2010.

L'apparition de nouveaux blocages des vannes aval consécutivement à la poursuite de la dégradation des rails (usure de 6 à 7 mm de profondeur pour Caderousse et jusqu'à 13mm à Vaugris) entrainera le remplacement des rails de roulement à partir de 2011 et jusqu'en 2025 pour retrouver une garantie de coupure du débit d'emballement nécessaire à la protection des groupes.

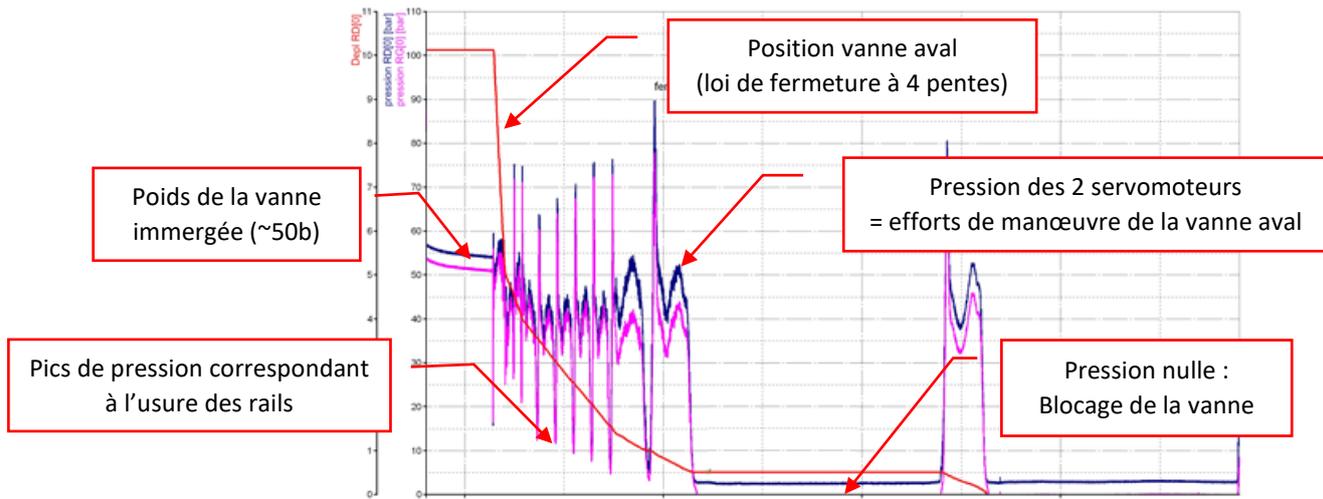


Figure 3 : Enregistrement temporel des pressions des servomoteurs de la vanne aval du groupe 3 de Caderousse (groupe fixe) lors de l'arrêt du groupe sur défaut avant rénovation des pièces fixes

Pour les groupes fixes, l'analyse des enregistrements des pressions des servomoteurs lors d'une fermeture permet de déterminer sa capacité de coupure : la pression des servomoteurs est, en effet, représentative des efforts de manœuvre de la vanne et donc de sa réserve de capacité de fermeture gravitaire.

Les efforts de frottement antagonistes à sa descente vont réduire le « poids apparent » de la vanne et par conséquent la pression des servomoteurs. Si la pression des servomoteurs devient nulle, la vanne se bloque.

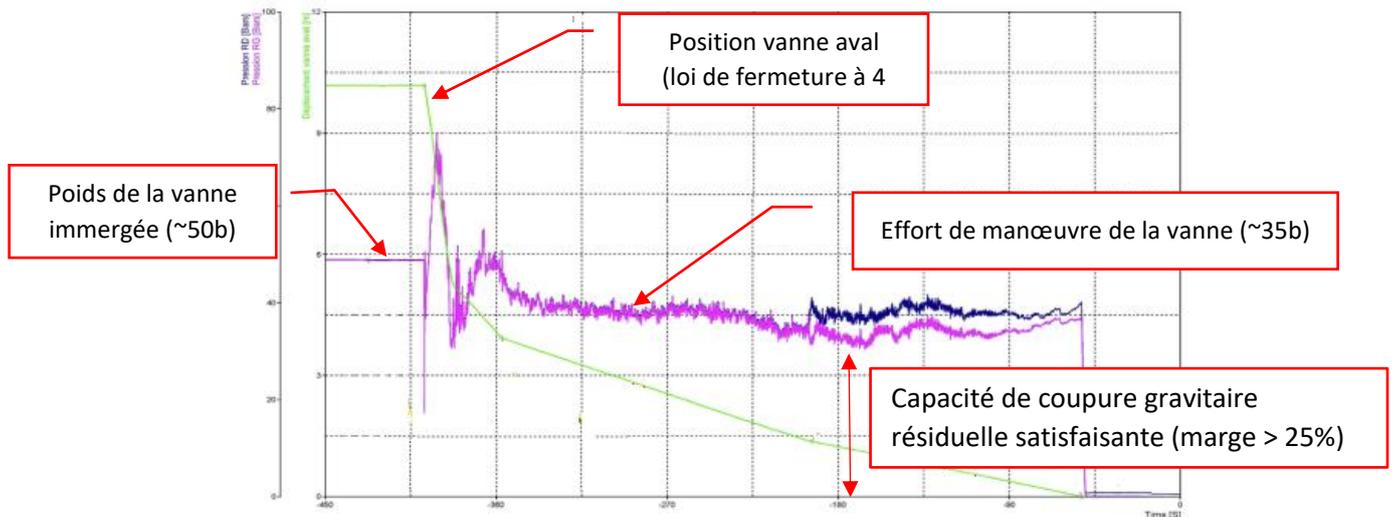


Figure 4 : Enregistrement temporel des pressions des servomoteurs de la vanne aval du groupe 3 de Caderousse (groupe fixe) lors de l'arrêt du groupe sur défaut après rénovation des pièces fixes

On note sur l'enregistrement réalisé après remplacement des rails, la disparition des pics de pression (au pas de 500mm) caractéristiques de cette usure des rails (bosses au pas de 500mm sur les 6/7 derniers mètres du rail). Le remplacement des rails de roulement des groupes fixes a permis de retrouver une garantie de coupure gravitaire du débit avec une marge supérieure à 25%.

Pour les groupes réglant, si la sollicitation des vannes aval est moindre que pour les groupes fixes, les galets de roulement et les rails de roulement subissent tout de même une usure significative au fil du temps qu'il faut pouvoir évaluer afin de maintenir une garantie de coupure suffisante.

Pour ces derniers groupes, la fermeture du vannage réduit le débit et la chute vue par la vanne. La mesure des pressions des servomoteurs n'est donc pas représentative de la capacité de coupure de la vanne aval en cas de défaillance du vannage (coupure de débit à l'emballement).

Il faut donc recourir à :

- Une étude numérique pour déterminer la sollicitation de la vanne aval (perte de charge) lors d'une coupure du débit d'emballlement en tenant compte des caractéristiques hydrauliques de la turbine et de la vanne aval.
- Une étude analytique pour établir les efforts de manœuvre de la vanne aval et sa capacité de coupure résiduelle dans ces conditions ultimes en prenant en compte l'état de l'usure des galets de roulement de la vanne et de ses pièces fixes.

### 3. MODELISATION NUMERIQUE 1 D DU GROUPE

#### 3.1. Modélisation du conduit hydraulique

La modélisation des séquences transitoires est réalisée avec l'outil de calcul numérique des transitoires de General Electric :

- La chute brute est donnée aux bornes du modèle.
- Le conduit hydraulique est modélisé comme une succession de conduits définis par une section moyenne et un coefficient de pertes de charge.
- La turbine est caractérisée par sa colline numérique issue d'essais sur modèle réduit.
- La vanne aval est caractérisée par sa loi de perte de charge issue d'essais sur modèle réduit.

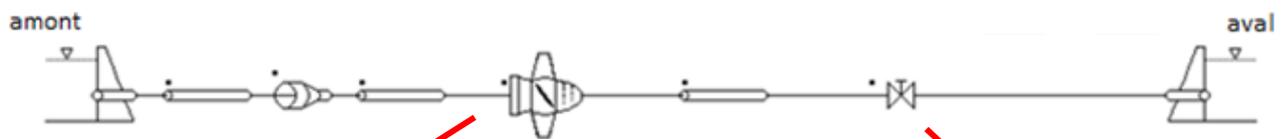


Figure 5 : modélisation 1D du groupe

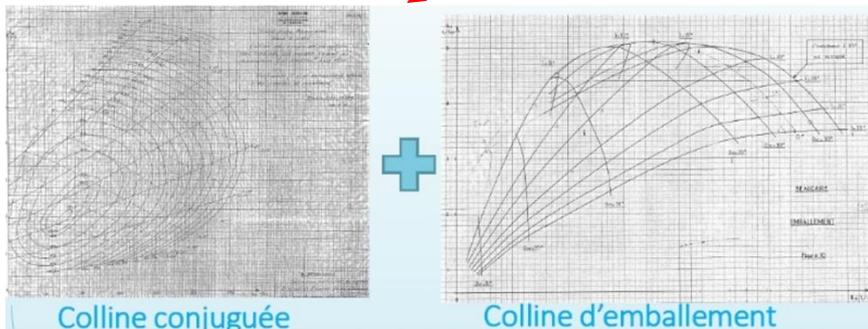


Figure 7 : Caractéristiques turbine (issues essais modèles)

Coefficient de Perte de Charge (PaC) de la vanne aval en fonction de l'ouverture c'est-à-dire de la distance « a » entre l'élément inférieur de la vanne et son seuil

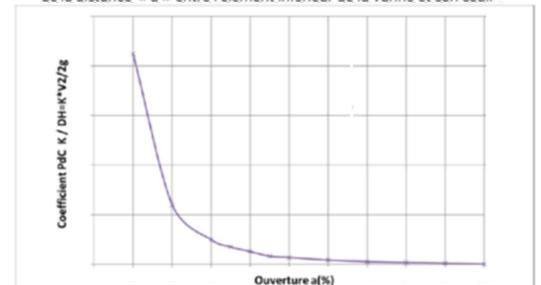


Figure 6 : Caractéristique perte de charge de la vanne aval

#### 3.2. Résultats numériques

Le calcul transitoire est réalisé en maintenant le vannage et les pales ouvertes aussi bien pour un groupe fixe que pour un groupe réglant (pour simuler leur défaillance conduisant à l'emballlement du groupe sans coupure aval).

La modélisation numérique permet de déterminer pour une hauteur de chute donnée l'évolution des grandeurs physiques du groupe et de la vanne aval en fonction de leur position, notamment :

- La vitesse du groupe,
- Le débit transitant par le conduit hydraulique,
- La pression amont et aval aux bornes du groupe et de la vanne aval.

La connaissance de la pression amont et aval aux bornes de la vanne aval permet de déterminer la chute nette vue par la vanne et d'en déduire la poussée hydraulique exercée sur la vanne.

La connaissance de la poussée hydraulique exercée sur la vanne aval en fonction de sa hauteur permet de calculer les efforts de frottement antagonistes à sa descente gravitaire.

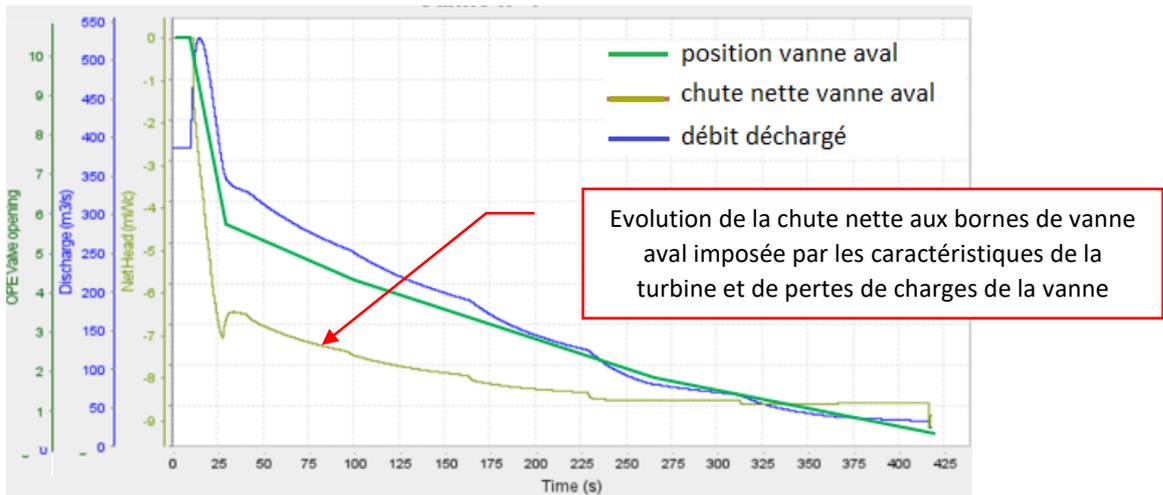


Figure 8 : Evolution des principales grandeurs physiques aux bornes de la vanne aval lors d'une coupure du débit

#### 4. MODELE ANALYTIQUE D'ÉVALUATION DES EFFORTS DE MANŒUVRE DES VANNES AVAL

La construction et la validation du modèle analytique sont menées sur les groupes fixes de Caderousse/Sauveterre après remplacement des rails de roulement et modification des galets de roulement (galets bombés montés sur roulement) afin d'avoir un fonctionnement nominal du groupe sans blocage.

Le choix de la construction du modèle sur un groupe fixe permet de comparer des enregistrements de fermeture de la vanne aval directement aux calculs analytiques sans l'influence de la coupure du débit par le vannage d'un groupe réglant.

##### 4.1. Construction du modèle analytique

Le modèle calcule l'effort de manœuvre de la vanne en fonction de la hauteur d'ouverture comme de la différence entre les efforts moteurs (descendants) et les efforts antagonistes (ascendants) :

$$\text{Efforts de manœuvre} = \sum \text{efforts moteurs} - \sum \text{efforts antagonistes}$$

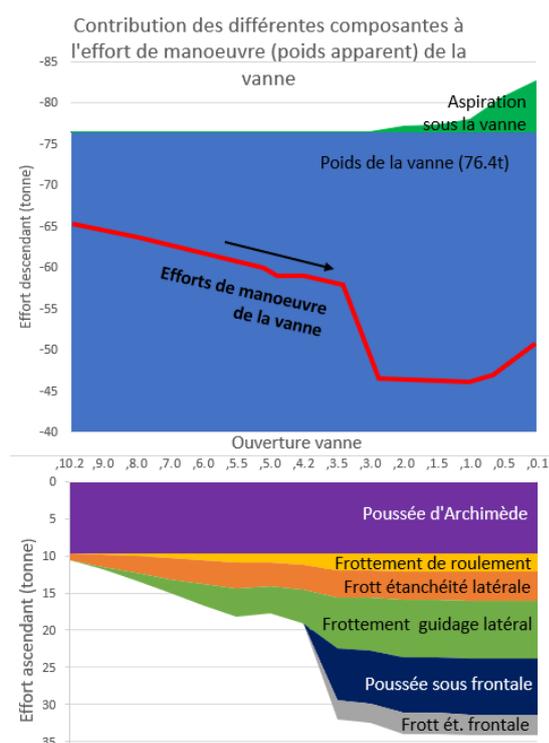


Figure 9 : Evolution de l'effort de manœuvre de la vanne

Le calcul des efforts de frottement est conforme aux règles de l'art de la DIN 19704 et des fascicules du programme Lubaqua.

Les coefficients de frottement sont recalés en fonction des mesures réalisées sur site. La poussée hydraulique utilisée pour le calcul du chargement de la vanne est issue du modèle 1 D.

L'aspiration en fin de coupure (effort moteur) est extrapolée des essais modèle sur vanne plate.

La poussée ascendante sous la frontale et le frottement du joint frontal (efforts antagonistes) s'exercent vers le haut dès que le joint frontal de la vanne s'applique sur le glacis amont (à partir de 4m d'ouverture) et assure l'étanchéité frontale de la vanne.

#### 4.2. Validation du modèle de calcul analytique des efforts de manœuvre des vannes aval

La comparaison des enregistrements réels de fermeture par rapport aux calculs analytiques montre une précision de l'ordre de +/-10% du modèle en fin de fermeture ce qui semble suffisant pour qualifier la capacité de coupure de la vanne aval.

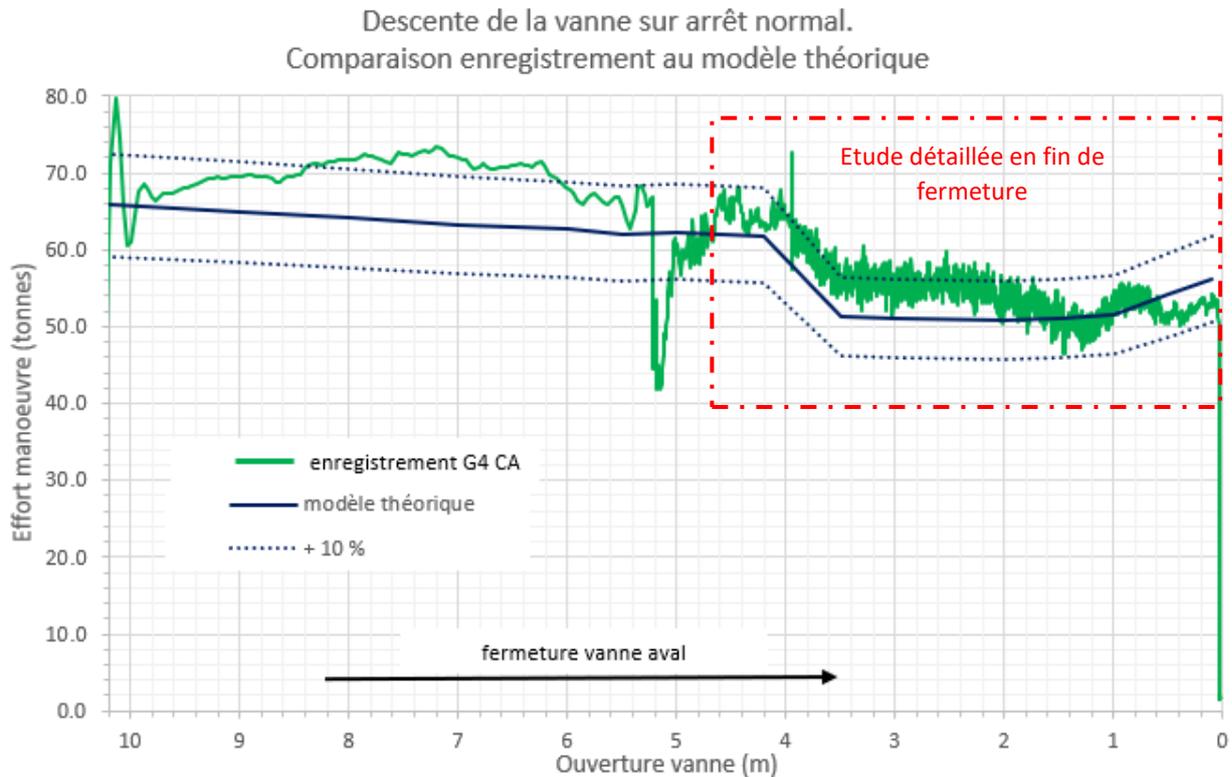


Figure 10 : comparaison de l'enregistrement de la fermeture de la vanne aval de CA après rénovation pièces fixes par rapport au modèle de calcul analytique

A noter que la précision du modèle (10%) est bien inférieure à la marge de sécurité recommandée par la DIN 19704 sur la capacité de fermeture (25%).

La précision du modèle est surtout regardée en dessous d'une hauteur 4 à 5m d'ouverture pour laquelle :

- la poussée hydraulique sur la vanne est la plus élevée (donc les efforts de frottements antagonistes sont plus importants)
- la vitesse de coupure de la vanne aval est ralentie (coupure quasi stationnaire)
- l'étanchéité amont est stable (frontale étanche sur le glaciais amont).

#### 4.3. Influence de l'usure des rails de roulement sur les efforts de manœuvre de la vanne aval

L'usure des rails se caractérise par une succession de creux dus à l'usure des rails sur les 6/7 derniers mètres du rail. Les creux sont au pas de 500mm correspondant au pas et à l'altimétrie des galets vanne en position fermée. Lorsque la vanne doit sortir des creux au cours de sa fermeture, la pente peut être assimilée, d'un point de vue calculatoire, à un frottement antagoniste de coefficient égal à la tangente de l'angle de la pente.

L'amplitude des pics de pression observée sur les groupes fixes est liée au taux d'usure du rail (profondeur des creux et/ou à la pente pour sortir du creux). On note que cette amplitude augmente avec la descente de la vanne traduisant le nombre croissant de creux à franchir par la vanne.

Le manque de données géométriques sur cette usure des rails empêche actuellement de construire un modèle robuste. A défaut de relevés précis, il a été mené une étude statistique pour caractériser l'évolution des pics de pression enregistrés en cours de fermeture en fonction de la hauteur de la vanne. Cette variation de pression ( $F_{pic}$ ) est rendue adimensionnelle en la divisant par la poussée hydraulique exercée sur la vanne au point de fonctionnement étudié.

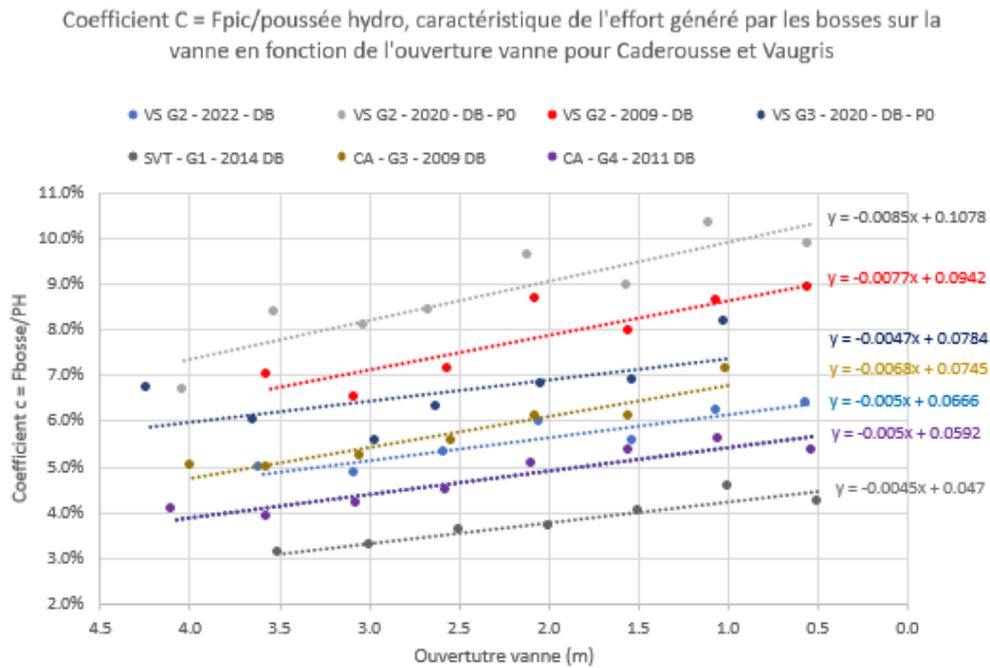


Figure 11 : détermination d'une loi statistique sur l'influence de l'usure des rails sur sa capacité de manœuvre

On note que l'évolution de ce coefficient est relativement linéaire : l'évolution croissante de ce coefficient avec la descente de la vanne est significative du nombre de creux croissant que doit franchir la vanne au cours de sa descente, sa valeur numérique est significative de l'usure des rails.

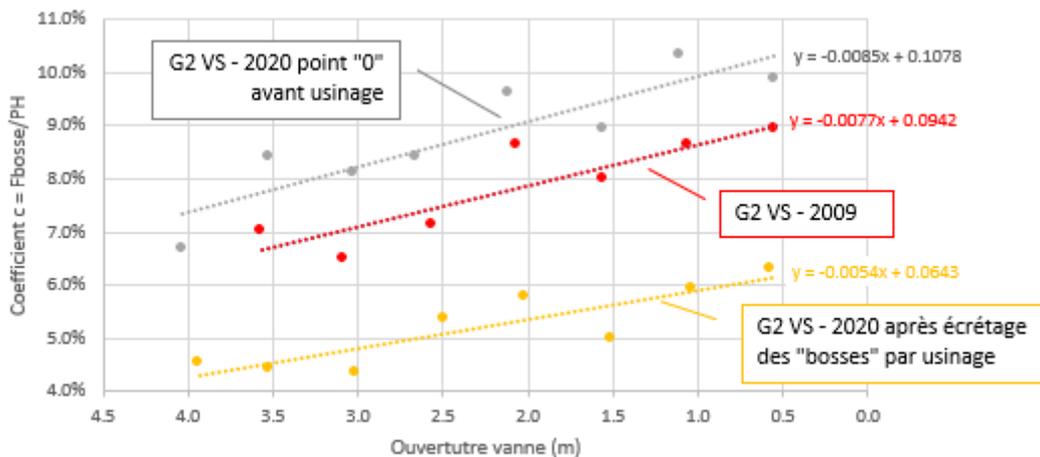


Figure 12 : évolution des coefficients de la loi statistique avec l'usure des rails

La dispersion de ces coefficients est néanmoins trop importante pour permettre d'établir une loi consolidée. Cette loi statique permet tout de même de donner une tendance sur l'évolution des efforts de manœuvre de la vanne en fin de fermeture avec des rails usés.

## 5. PERSPECTIVE POUR L'ANALYSE DE LA CAPACITE DE COUPURE DES VANNES AVAL DES GROUPES REGLANT

Comme pour les groupes fixes, les paliers autolubrifiants des galets et les rails de roulement subissent au fil des années une usure continue dégradant leur capacité de coupure gravitaire. Le modèle analytique précédemment validé doit permettre de déterminer de façon factuelle l'état d'usure de la vanne et des rails et de programmer des travaux de réhabilitation adaptés.

Pour Chautagne (haut Rhône), on note les premiers blocages des vannes en marche déchargeur dans les années 2015. A la suite d'expertises, il est noté une très forte dégradation des rails de Chautagne (de l'ordre de 5 à 7mm) pouvant être à l'origine de ces blocages.

### 5.1.Recalage et exploitation du modèle analytique pour la vanne aval du G2 Chautagne

Pour les groupes réglant, il existe un point de fonctionnement particulier permettant de valider et/ou recaler le modèle analytique par rapport à un enregistrement réel.

En marche déchargeur (MDCH), les pales et le vannage sont commandés à pleine ouverture. Dans ces conditions, seule la vanne aval participe à la coupure et au réglage du débit : la mesure de l'effort de manœuvre en MDCH est comparable aux résultats du calcul analytique pour une même hauteur de vanne aval.

Pour le G2 de Chautagne, les efforts de manœuvre sont calculés grâce au modèle analytique et comparés aux enregistrements d'une MDCH avec une vanne aval équipée de paliers autolubrifiants (déjà rénovés auparavant) puis aux enregistrements d'une MDCH après remplacement des galets d'origine par des galets bombés montés sur roulement. Le calcul est fait, dans un premier temps, sans tenir compte de l'usure des rails.

Le modèle analytique montre que :

- Les résultats des calculs sont très proches des enregistrements en MDCH.
- Les paliers autolubrifiants sont suffisants (vis-à-vis de leur coefficient de frottement estimé à 0.12) pour garantir la coupure gravitaire depuis l'emballement du groupe (hors usure des rails).
- L'usage de paliers montés sur roulement augmente fortement cette marge de sécurité.

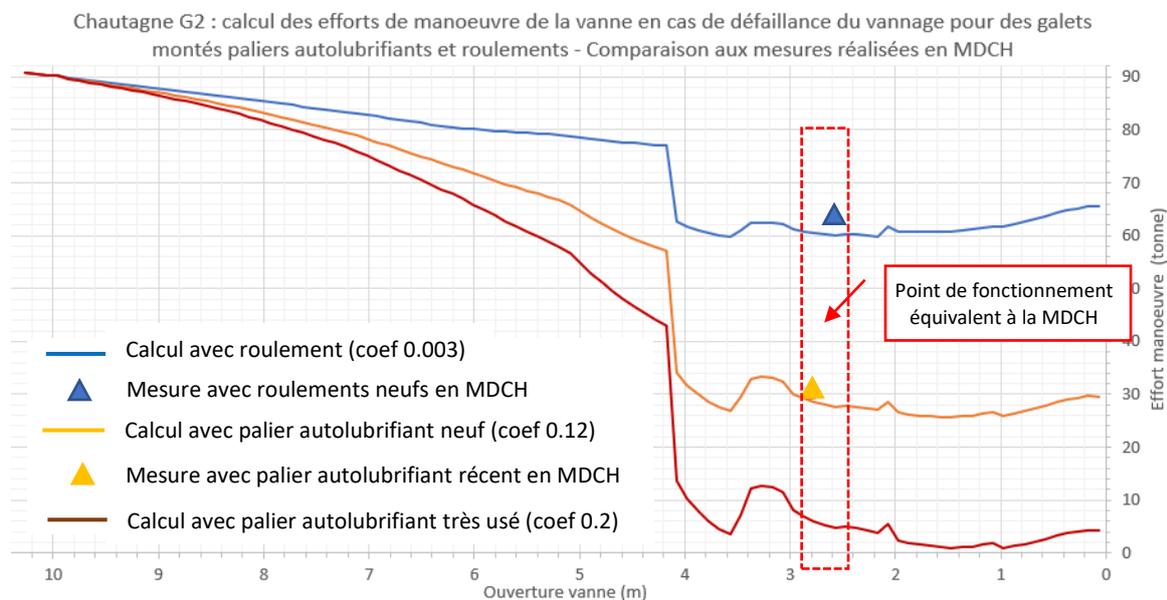


Figure 13 : Comparaison des efforts de manoeuvre en fonction du coefficient de frottement du guidage des galets

A noter qu'une forte dégradation des paliers autolubrifiants (coef de frottement supérieur à 0.2) peut également conduire au blocage de la vanne sans usure des rails (cas observés sur les vannes aval de Beaucaire).

## 5.2. Influence de l'usure des rails de roulement sur la capacité de coupure de la vanne aval du G2 de Chautagne

L'usure des rails de Chautagne étant du même ordre de grandeur que les rails des groupes fixes de Caderousse, la loi statistique définie au §4.3 est superposée au modèle analytique pour estimer les efforts de manœuvre en fin de fermeture depuis l'emballlement. L'amplitude des pics est recalée par rapport au pic de pression mesuré en MDCH.

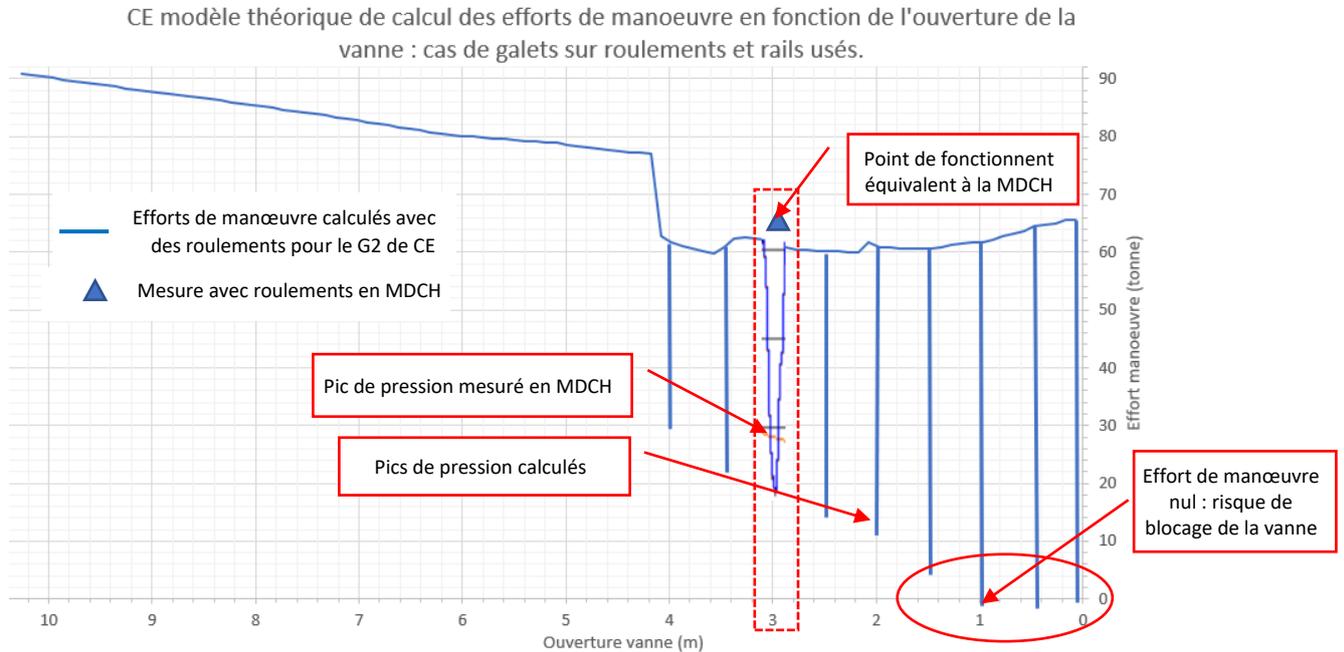


Figure 14 : influence de l'usure des rails sur la capacité de descente de la vanne

Le modèle de calcul montre que le remplacement des paliers autolubrifiants par des galets à roulement a permis de sécuriser la MDCH malgré l'usure des rails (capacité de manoeuvre résiduelle ~ 20t en MDCH).

On note également que l'effort de manoeuvre s'annule sur les dernières bosses du rail : le risque de blocage de la vanne est important. La mise en sécurité du groupe (coupure gravitaire à l'emballlement) nécessite le remplacement des rails.

## 6. BILAN ET PERSPECTIVE

Le modèle analytique développé par la CNR permet d'évaluer les efforts de manoeuvre des vannes aval en fonction de leur usure et de leurs conditions d'exploitation.

Ce modèle permet de définir, sur la base de données factuelles, le type de réhabilitation à mettre en oeuvre pour garantir la capacité de coupure des vannes aval (remplacement des rails et/ou des galets seuls).

La prise en compte de l'influence de l'usure des rails sur les efforts de manoeuvre par ce modèle de calcul est encore imprécise et mérite d'être consolidée. Le développement d'un procédé de mesures subaquatiques à l'aide d'un scan 3D devrait permettre de mesurer l'usure des rails afin d'affiner ce modèle (procédé en cours de développement par la CNR).

## REMERCIEMENTS

Ce projet a été mené à bien grâce à la participation :

- D'Eliette LEBRUN pour la construction des modèles analytiques et l'analyse des données issues des enregistrements de coupure des vannes aval dans le cadre de son stage de fin d'études d'ingénieur INSA Lyon
- Le bureau d'études de GE hydro Grenoble pour la mise à disposition des études transitoires et des études analytiques exploratoires sur la coupure des vannes aval

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] DIN 19704 – Edition 2014, Constructions hydrauliques en acier
- [2] Programme LUBAQUA - FRT 101 - les organes de roulement
- [3] Programme LUBAQUA - FRT 105 - Les pièces fixes
- [4] Programme LUBAQUA - FRT 107 - Organes de manœuvre