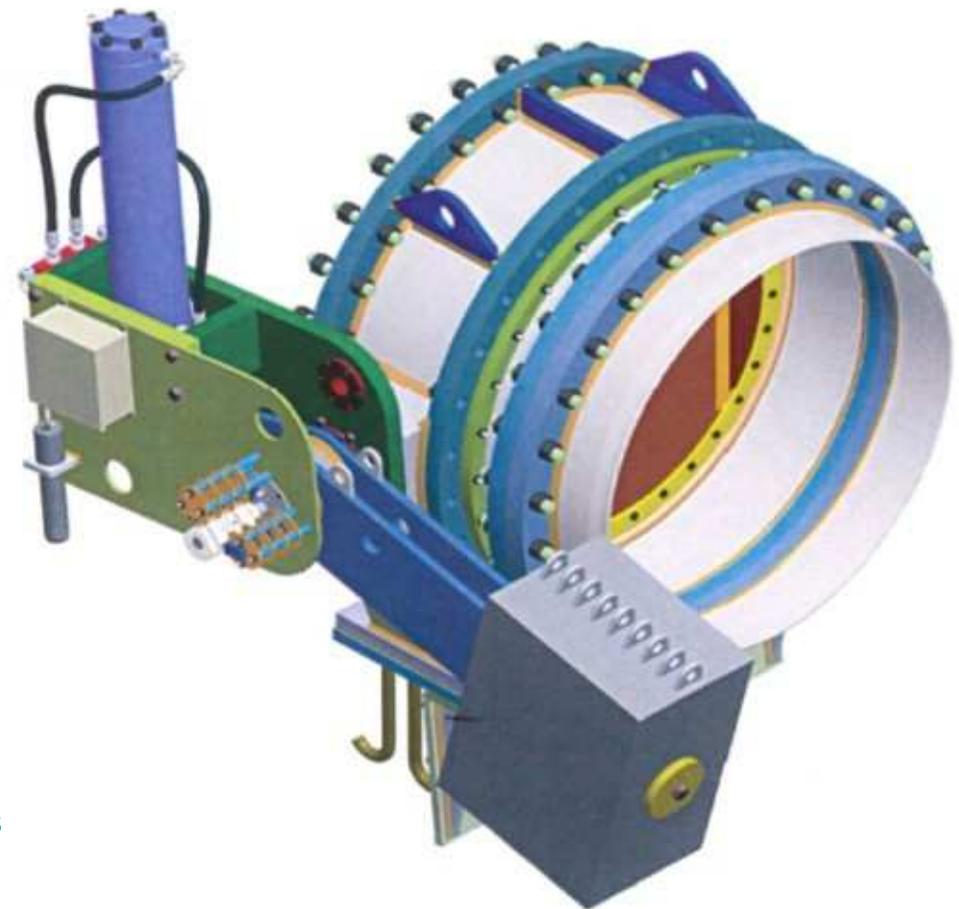


Thème : Vantellerie de barrages dans les EDD, RS, VTA et ETC

# Diagnostics de tenue en fatigue des vannes de fond

Philippe BRYLA  
Romain BEAUFILS  
Laurent SUBLET  
Jean-Louis BALLESTER



Colloque CFBR  
Vantellerie, contrôle-commande, télécom et alimentations électriques  
pour des barrages plus sûrs  
2 et 3 décembre 2015 – Chambéry

# SOMMAIRE

## 1. INTRODUCTION

## 2. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE EN FATIGUE DES VANNES

Principales étapes de la démarche de diagnostic

Analyse modale expérimentale et calcul modal

Analyse vibratoire

Analyse des contraintes et évaluation du dommage

## 3. EXEMPLE D'APPLICATION À LA VANNE DE FOND DE GNIOURE

## 4. VERS UNE DÉMARCHE SIMPLIFIÉE

## 5. CONCLUSION

# 1. INTRODUCTION (1/2)

- **Le besoin d'engager des diagnostics en fatigue sur des vannes de fond de type papillon est apparu à EDF ces dernières années**
- **Ces diagnostics sont généralement engagés dans 2 cas :**
  - Détection d'anomalies (bruits, vibrations...) par l'exploitant à l'occasion d'essais périodiques de fonctionnement
  - Besoin temporaire (quelques semaines à quelques mois) d'utilisation de la vanne à ouverture partielle
- **Ce type de diagnostic est a priori très complexe :**
  - Chargements hydrauliques complexes (écoulements diphasiques, avec détachements tourbillonnaires, bruit large bande, de turbulence, implosion de poches de cavitation) : difficiles à mesurer et impossibles à calculer précisément
  - Évaluation des modes vibratoires très sensible aux hypothèses sur la rigidité des liaisons internes de la structure et aux conditions aux limites
    - ❖ Liaisons de rigidité inconnue entre éléments de la chaîne cinématique
    - ❖ Liaisons avec jeux
    - ❖ Interfaces avec le Génie Civil

# 1. INTRODUCTION (2/2)

- **Nécessité de mettre en œuvre une approche mixte reposant sur 2 analyses complémentaires :**
  - Une compréhension du comportement dynamique de la vanne (hydraulique et vibrations) au moyen d'essais vibratoires et extensométriques
  - Une analyse basée sur le calcul et l'analyse des contraintes
- **Nécessité de faire travailler ensemble plusieurs domaines de compétence :**
  - Diagnostic de fonctionnement
  - Vibrations (mesures et calculs)
  - Extensométrie
  - Modélisation mécanique

# 2. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

## *Principales étapes de la démarche de diagnostic*

### **I. Positionnement d'une instrumentation défini sur la base de 2 analyses préalables :**

- Analyse modale expérimentale, éventuellement complétée d'un calcul modal
- Calcul des contraintes (en statique)

### **II. Essais en fonctionnement aux différentes ouvertures de la vanne :**

- Mesures vibratoires
- Mesures des déformations par jauges extensométriques

### **III. Analyse spectrale des signaux pour déterminer la réponse de la structure : quasi-statique, résonante ou en régime forcé**

### **IV. Si on détecte des résonances : nécessité de modifier la structure ou l'écoulement pour revenir à une situation quasi-statique**

### **V. Évaluation de l'aptitude au service de la vanne :**

- Estimation du dommage à partir des mesures extenso et du modèle de calcul
- Contrôles Non Destructifs des zones les plus sollicitées et surveillance

# 2. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

## *Analyse modale expérimentale et calcul modal*

- **Identification des modes propres des différents sous-systèmes :**
  - Sollicitation ponctuelle au marteau de chaque sous-système : Corps, opercule, chaîne cinématique
  - Mesure de la réponse (structure à l'arrêt) au moyen d'accéléromètres
  - Positionnement des accéléromètres : à partir d'un calcul modal aux éléments finis ou à dire d'expert
  
- **Comparaison calculs-mesures sur les 1<sup>ers</sup> modes**
  
- **Les divergences entre le modèle et les mesures sont fréquents. Ils peuvent provenir de différentes causes :**
  - Modélisation incorrecte de la rigidité des liaisons internes entre sous-systèmes
  - Non prise en compte des jeux entre éléments mobiles
  - Prise en compte d'une raideur inappropriée (ex. : encastrement béton)
  
- **La comparaison des 2 analyses permet généralement de recalibrer certaines hypothèses du modèle**

# 2. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

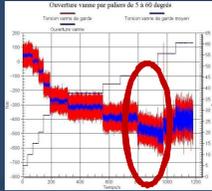
## *Analyse vibratoire*

- **Le comportement vibratoire de chaque sous-système est classé dans l'une des 3 catégories suivantes :**
  - Comportement **quasi-statique** :
    - ❖ Excitation par un bruit hydraulique large bande
    - ❖ Pics du spectre fréquentiel très larges, sans facteur d'amplification important
  - Comportement en **régime forcé** :
    - ❖ Niveaux vibratoires élevés (caractère aléatoire)
    - ❖ Plusieurs fréquences propres détectées, sans émergence marquée de l'une d'entre elles
  - Comportement **résonant** :
    - ❖ Vibrations à bande étroite
    - ❖ Fréquence propre excitée proche de celle identifiée par l'analyse modale
- **Analyses complémentaires (Kurtosis, corrélation temporelle des signaux...) afin de détecter des chocs, des jeux ou de la cavitation**
- **Réduction du niveau vibratoire pour les régimes forcés ou résonants :**
  - Corrections structurelles (masse, raideur)
  - Modification de l'écoulement (ex. : aération)

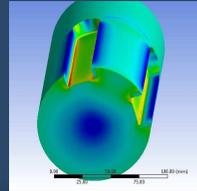
# 2. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

## Analyse des contraintes et évaluation du dommage

### Mesures extensométriques



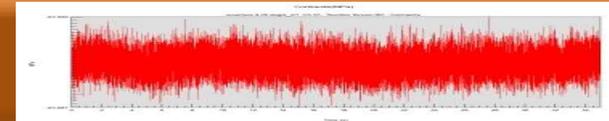
### Modèle mécanique



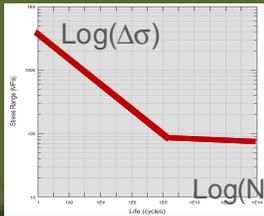
- Coefficient de concentration de contrainte :  $K_F$
- Coefficient d'incertitude de positionnement :  $K_{LOC}$

### Contrainte dans la zone la plus sollicitée

$$\sigma_{\max} = K_F \cdot K_{LOC} \cdot \sigma_{\text{mesurée}}$$

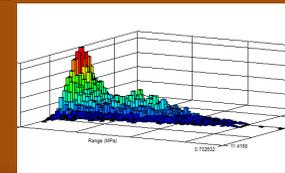


### Courbe de Wöhler du matériau

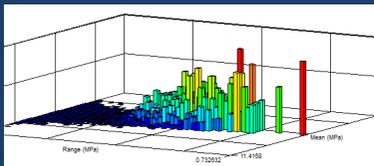


- Acier moulé
- Acier forgé
- Structure mécano-soudée

### Comptage rainflow des cycles



### Histogramme du dommage



### Estimation du dommage global (cumul de Miner)

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

# 3. APPLICATION À LA VDF DE GNIIOURE

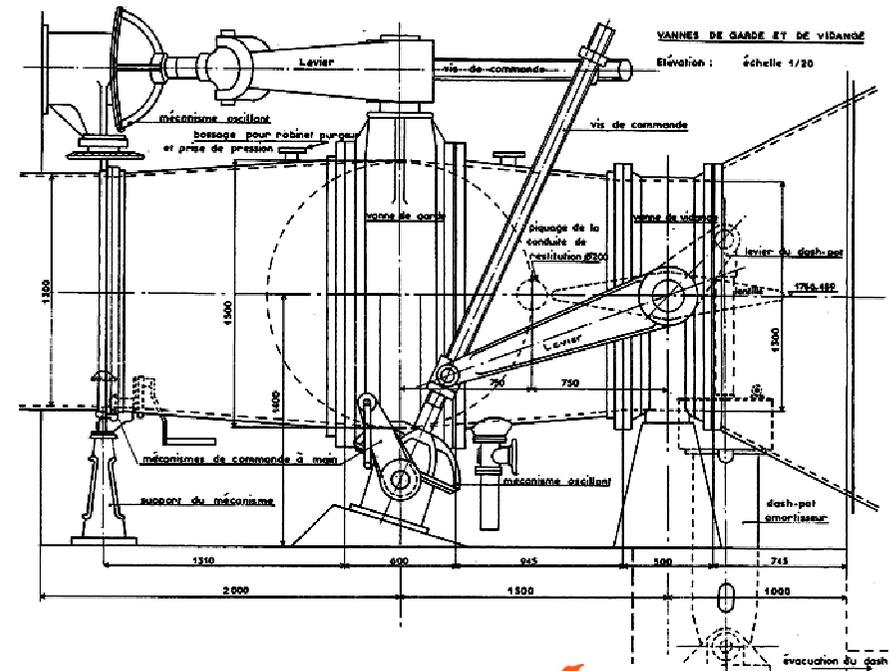
## Présentation de la vanne

### ■ Contexte du diagnostic :

- **Printemps 2011** : exploitation temporaire du barrage à une cote inférieure à celle des évacuateurs de surface
- On cherche à vérifier la **possibilité d'utiliser la vanne de fond à ouverture partielle pour évacuer les débits supérieurs au débit de l'usine**

### ■ Caractéristiques de la vanne de fond de Gnioure :

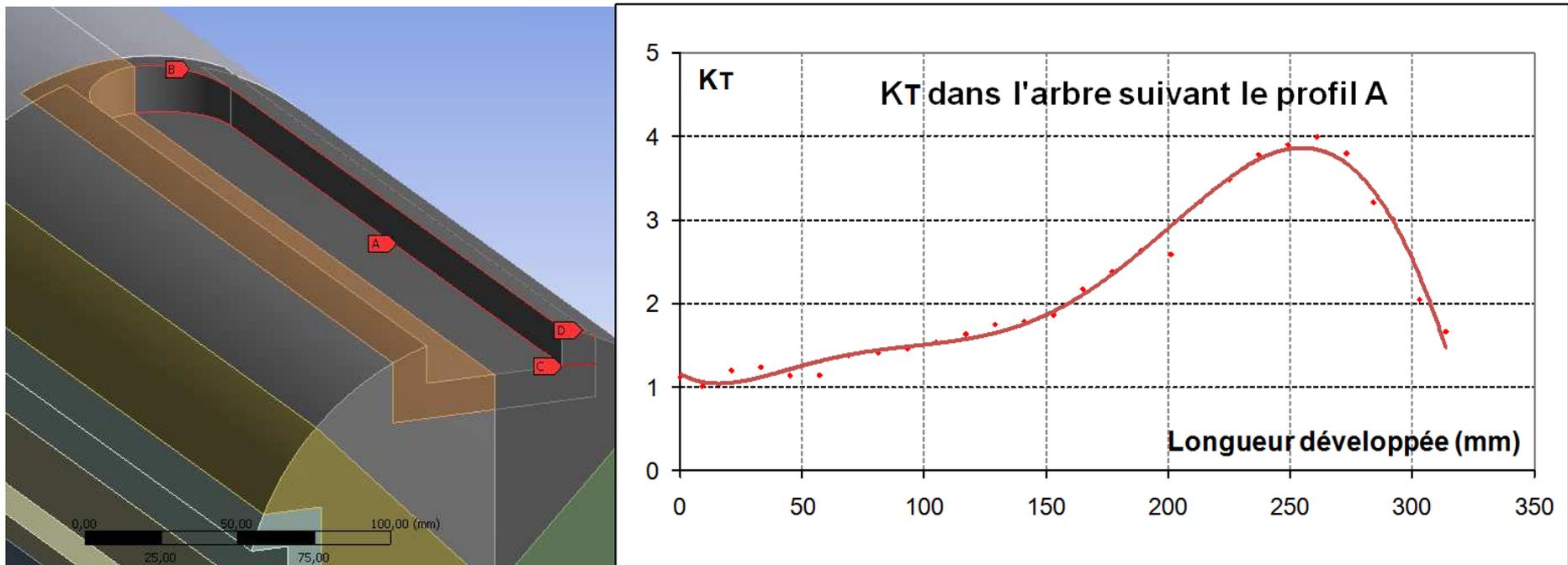
- Vanne papillon en acier moulé
- Diamètre = 1 300 mm
- Liaison lentille - arbre par goupilles
- Liaison arbre – bras moulé par clavettes
- Chaîne cinématique de type vis-écrou
- Présence d'un dashpot
- Diffuseur conique à l'aval de la vanne



# 3. APPLICATION À LA VDF DE GONIOURE

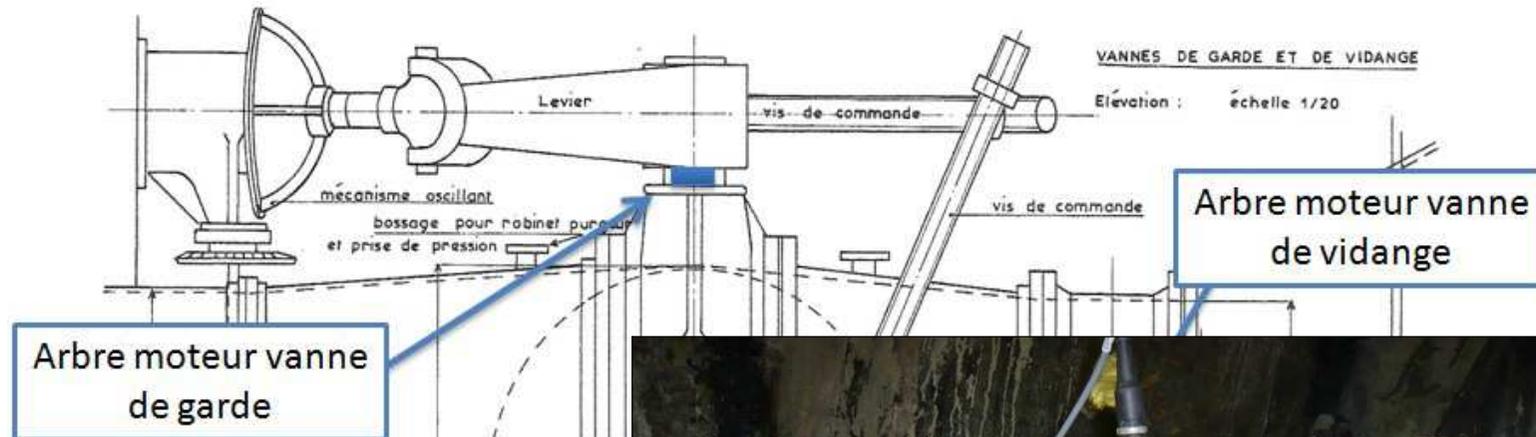
## *Calcul mécanique des contraintes*

- **Calcul mécanique préalable :**
  - Les zones les plus critiques sont les rainures de clavettes de l'arbre moteur
  - Concentrations de contrainte importantes :  $K_T = 4$  (calcul éléments finis)



# 3. APPLICATION À LA VDF DE GNIIOURE

## Schéma de l'instrumentation – jauges de déformation

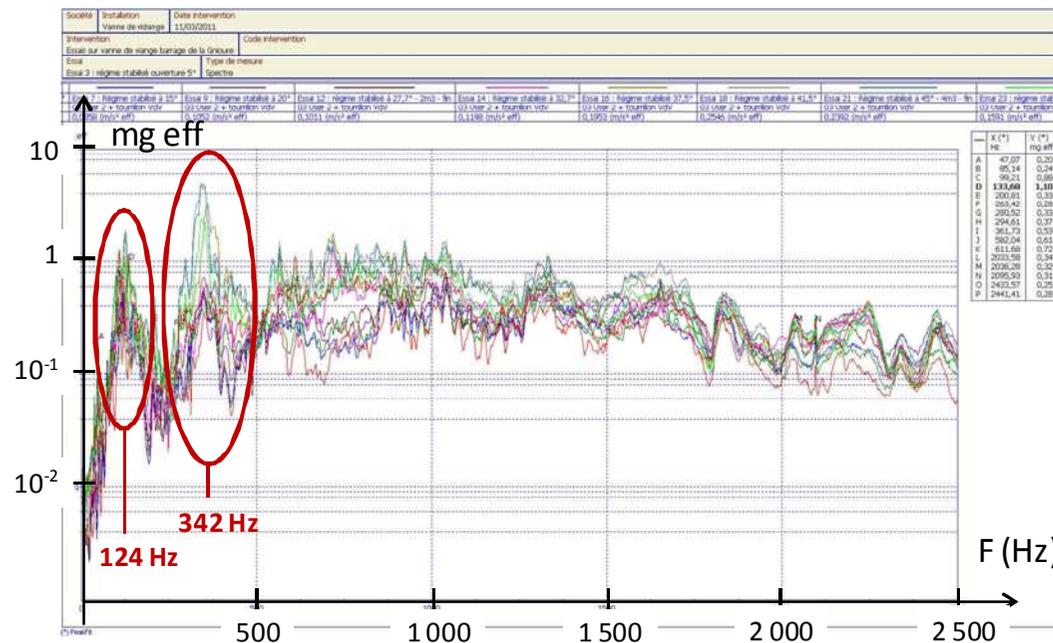


-  Pont de torsion
-  Pont de traction-compression

# 3. APPLICATION À LA VDF DE GONIOURE

## Essais et analyse vibratoire

- **Déroulement des essais :**
  - Ouverture progressive de la vanne de 0° à 60° par pas de 5°
- **Analyse spectrale des mesures par accéléromètres**
  - Niveau vibratoire global porté par des émergences à 124 Hz et 342 Hz
  - Les niveaux sont faibles quel que soit l'ouverture entre 0° et 60°
  - Régime **quasi-statique**
  - Facteur Kurtosis proche de 3 (distribution des signaux quasi normale)  
⇒ **Absence de jeux anormaux dans les dentures**

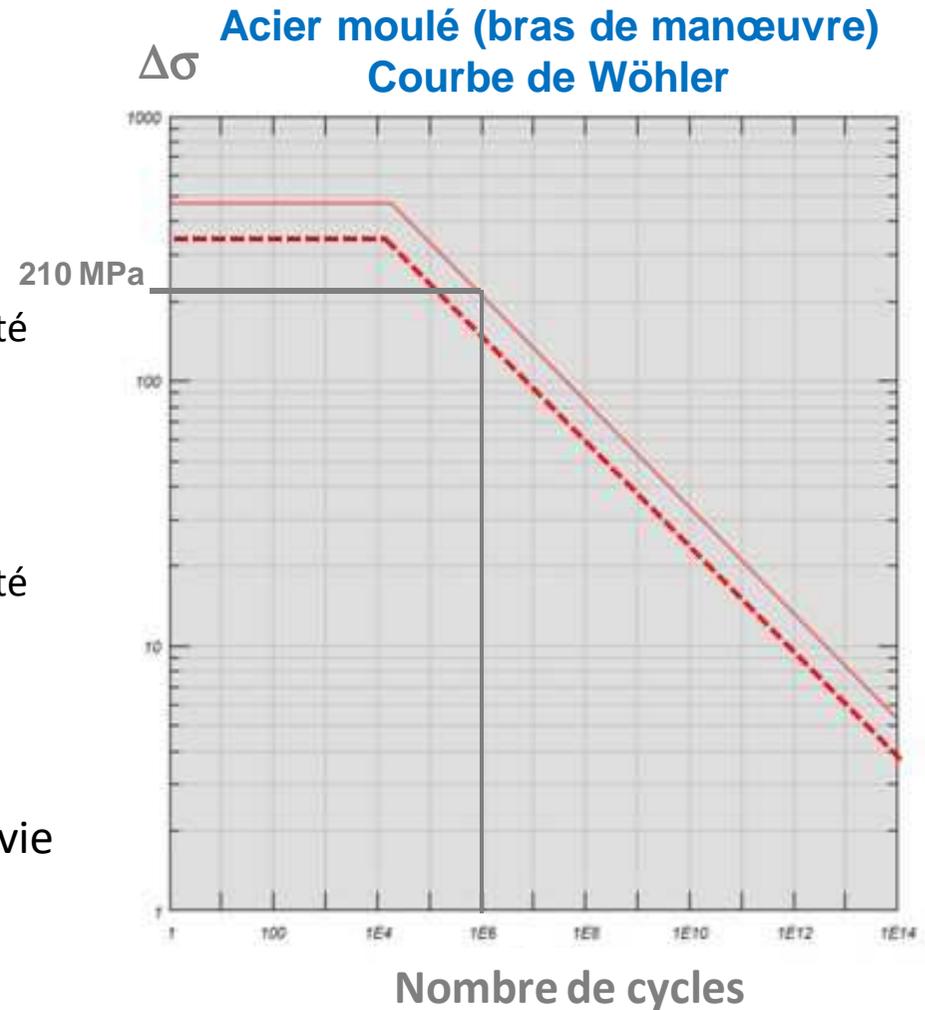


# 3. APPLICATION À LA VDF DE GNIIOURE

## Estimation du dommage en fatigue (1/3)

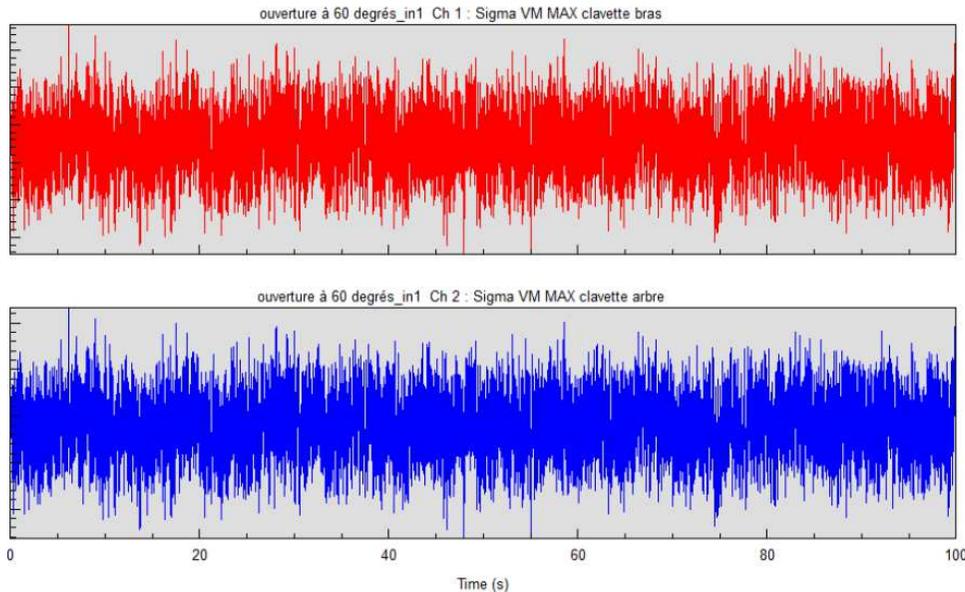
### ■ Hypothèses de modélisation de la loi de fatigue du matériau :

- Bras de manœuvre :
  - ❖ Acier moulé -  $R_m = 420$  MPa
  - ❖ Surface corrodée et exposée à l'humidité
  - ❖  $\Delta\sigma_D (10^6 \text{ cycles}) = 0,5 \times 420 = 210$  MPa
- Arbre de la lentille :
  - ❖ Acier forgé -  $R_m = 530$  MPa
  - ❖ Surface corrodée et exposée à l'humidité
  - ❖  $\Delta\sigma_D (10^6 \text{ cycles}) = 0,5 \times 530 = 265$  MPa
- Prise en compte de courbes de fatigue correspondant à une probabilité de survie de 99% (pointillés)



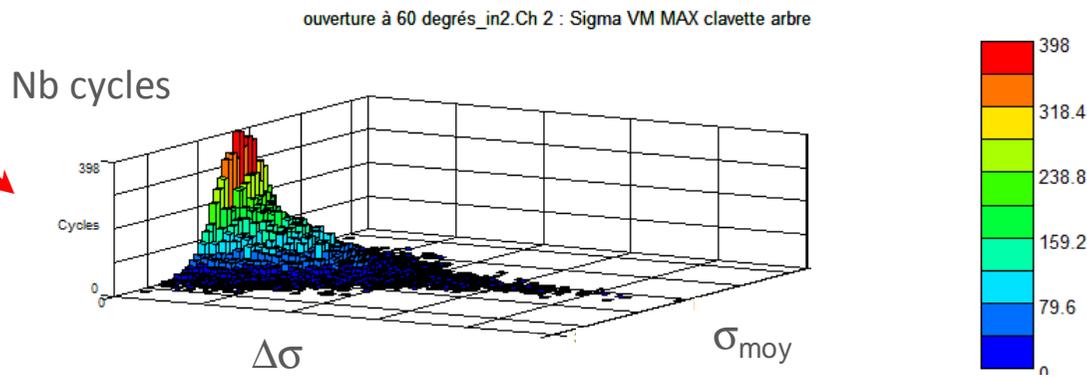
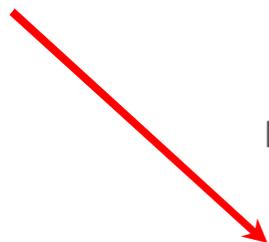
# 3. APPLICATION À LA VDF DE GONIOURE

## Estimation du dommage en fatigue (2/3)



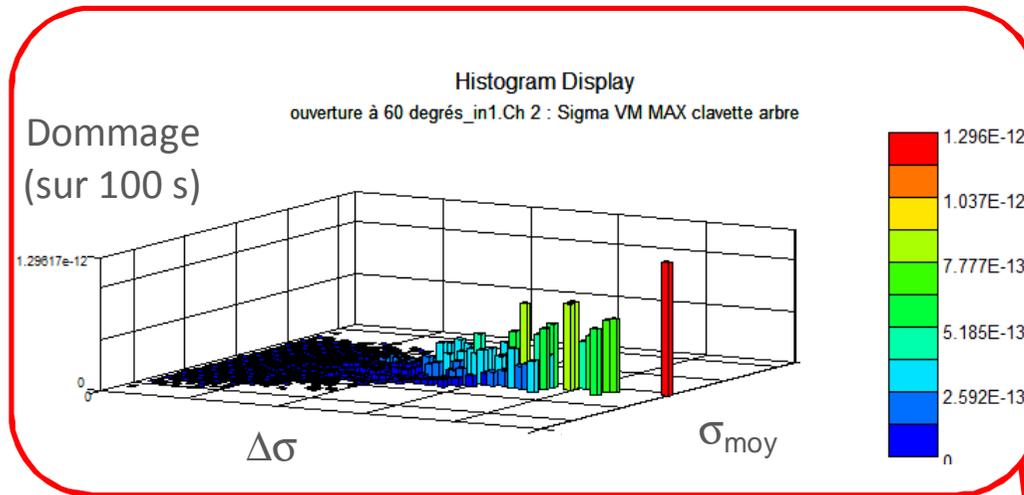
### Comptage des cycles de contrainte

- Enregistrements à ouverture stationnaire de 0° à 60°
- Utilisation du logiciel nCODE®
- Construction d'histogrammes  $N_{\text{cycles}} = f(\sigma_{\text{moy}} ; \Delta\sigma)$

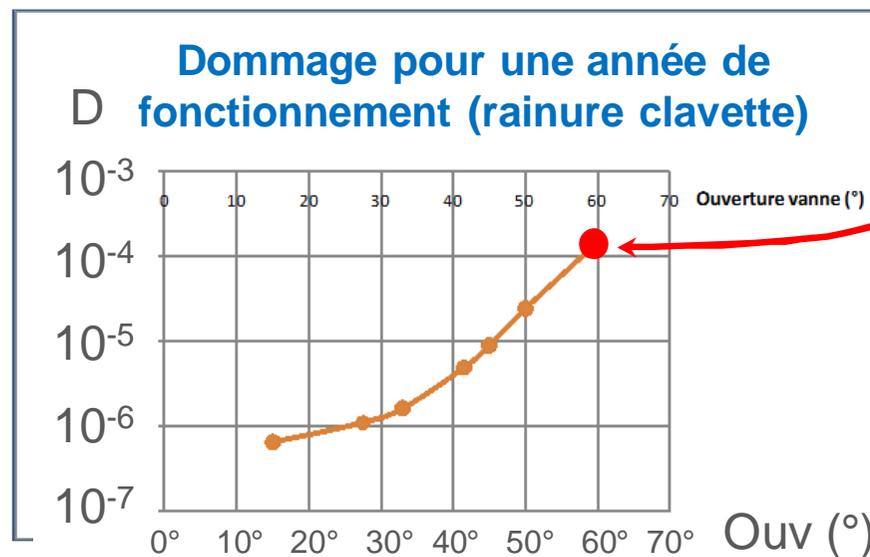


# 3. APPLICATION À LA VDF DE GONIOURE

## Estimation du dommage en fatigue (3/3)



- **Conclusions de l'analyse:**
- $D \sim 10^{-4}$  pour une année de fonctionnement à 60° d'ouverture
- Dommage très faible compatible avec l'utilisation de la vanne à ouverture partielle sur quelques mois



# 4. VERS UNE DÉMARCHÉ SIMPLIFIÉE (1/2)

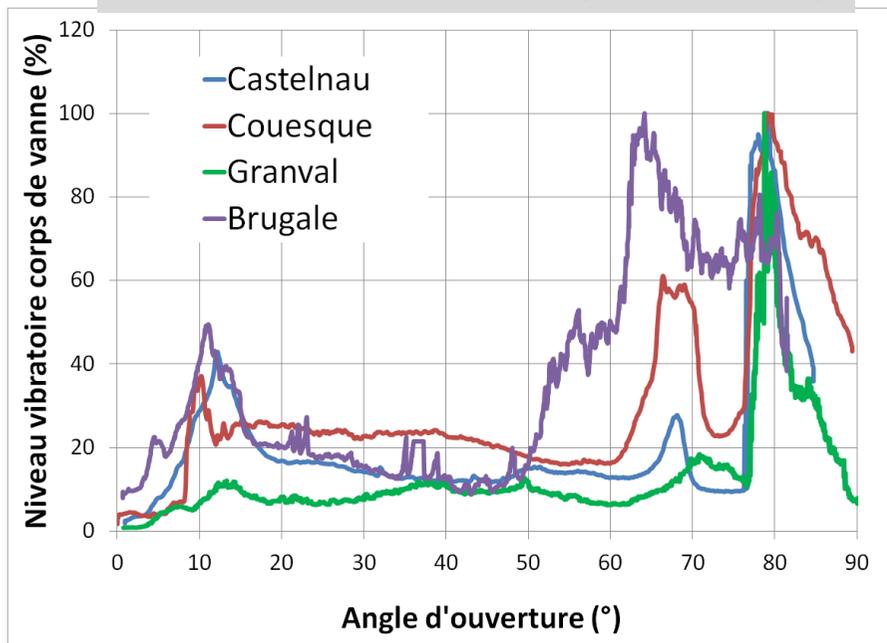
- **La mise place des jauges extensométriques et l'analyse en fatigue sont des étapes complexes et coûteuses**
- **Cependant :**
  - Les différents diagnostics réalisés sur des vannes papillons révèlent un comportement souvent similaire
  - ⇒ Un diagnostic reposant sur des analogies avec des diagnostics existants est envisageable en faisant l'économie des mesures extensométriques lorsque l'analyse vibratoire ne met en évidence aucun phénomène critique
- **Pour cela, une base de données d'essais a été créée à EDF/DTG. Elle contient :**
  - L'évolution du couple de torsion en fonction de l'angle d'ouverture
  - L'évolution du comportement vibratoire en fonction de l'angle d'ouverture
  - Des exemples significatifs de dysfonctionnements avec leurs particularités

# 4. VERS UNE DÉMARCHE SIMPLIFIÉE (2/2)

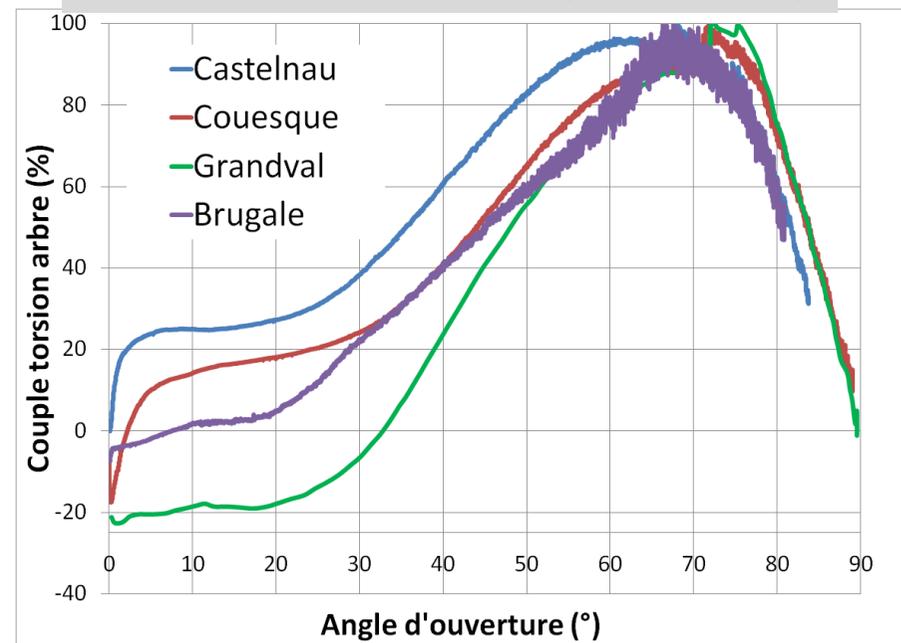
## ■ Constats réalisés sur plusieurs diagnostics de vannes papillons :

- Les maxima d'efforts (en statique) sont atteints vers 60° d'ouverture
- La tendance à la fermeture est bien vérifiée, même sans excentration de la lentille
- Le comportement vibratoire
  - ❖ progresse faiblement en fonction de l'ouverture aux faibles ouvertures
  - ❖ se stabilise aux ouvertures intermédiaires
  - ❖ se dégrade fortement dans la seconde moitié d'ouverture.  
Cette dégradation est souvent liée à l'apparition de cavitation

Niveau vibratoire = f(ouverture)



Couple de torsion = f(ouverture)



# 5. CONCLUSIONS

- **Plusieurs diagnostics en fatigue sur des vannes de fond ont été réalisés par la mise en œuvre d'une méthodologie rigoureuse mais complexe**
  - Essais coûteux (extensométrie) nécessitant une préparation importante
  - Démarche multi-compétences
- **Ces diagnostics permettent de conclure sur l'aptitude au service des vannes de fond sur une durée déterminée d'utilisation prolongée à ouverture partielle**
- **Perspectives de progrès :**
  - Trouver des données d'essais sur la résistance à la fatigue des matériaux anciens (notamment forgés et moulés)
  - Poursuivre la capitalisation de diagrammes de contraintes et de vibrations pour permettre une application plus systématique d'une démarche simplifiée sans extensométrie

An aerial photograph of a mountain valley covered in snow. A river flows through the center of the valley, surrounded by snow-covered slopes and rocky outcrops. The text "MERCI DE VOTRE ATTENTION!" is overlaid in the center in orange.

MERCI  
DE VOTRE ATTENTION!