

# EVALUATION DE LA DUREE DE VIE DES EQUIPEMENTS DE VANTELLERIE SOU MIS A LA FATIGUE PAR UNE APPROCHE ENRICHIE EN FATIGUE PROBABILISTE ET MECANIQUE DE LA RUPTURE

## TRAVAUX DE CHAIRE DE RECHERCHE MEDELIA

*Assessment of the fatigue life of hydraulic equipment using an  
enriched approach in probabilistic Fatigue and fracture mechanics*

*Research Work of the Medelia Research Chair*

**Auteur correspondant :**

**Arnaud ISAAC**

SPRETEC, 6 rue de Lorraine 38130 Échirolles, FRANCE.

[arnaud.isaac@spretec.arteliagroup.fr](mailto:arnaud.isaac@spretec.arteliagroup.fr)

**Auteurs de la communication :**

**Vincent MICHAUD**

SPRETEC, 6 rue de Lorraine 38130 Échirolles, FRANCE

[vincent.michaud@spretec.arteliagroup.com](mailto:vincent.michaud@spretec.arteliagroup.com)

**Julien BAROTH**, Maître de conférences

Laboratoire 3SR, 1270 Rue de la Piscine, 38610 Gières, FRANCE.

[julien.baroth@3sr-grenoble.fr](mailto:julien.baroth@3sr-grenoble.fr)

**Rafael ESTEVEZ**, Professeur

Laboratoire SIMaP, 1130 Rue de la Piscine, 38402 Saint Martin d'Hères, FRANCE.

[Rafael.Estevez@simap.grenoble-inp.fr](mailto:Rafael.Estevez@simap.grenoble-inp.fr)

**Kamal HARB**, Doctorant chercheur associé de la Chaire Medelia

6 avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex 1, FRANCE.

[kamal.harb@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:kamal.harb@univ-grenoble-alpes.fr)

## MOTS CLEFS

Structures métalliques mécano-soudées, Fatigue polycyclique, Durée de vie résiduelle, Mécanique de la rupture, Éléments finis stochastiques, Modélisation probabiliste, Eurocode 3, Courbe de Wöhler, loi de Miner, Ouvrages hydrauliques.

## RÉSUMÉ

*Ce projet d'étude propose une approche méthodologique pour appréhender les défis inhérents au vieillissement des ouvrages hydrauliques. Son objectif principal est de fournir aux gestionnaires des outils d'évaluation de la durée de vie résiduelle (DVR) afin d'éclairer les décisions relatives aux scénarios de maintenance. La méthodologie adoptée repose sur la fatigue probabiliste, spécifiquement appliquée aux organes hydromécaniques des ouvrages de vantellerie, en se basant sur la mécanique de la rupture et la méthode des éléments finis stochastiques, mettant en évidence les incertitudes liées aux chargements, aux caractéristiques des matériaux, aux qualités de réalisation, à la géométrie ainsi que d'autres paramètres. Cette étude permet ainsi une caractérisation probabiliste des dommages et de la durée de vie résiduelle (DVR), promettant ainsi une évaluation plus approfondie. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives dans la compréhension scientifique de la durabilité des structures métalliques en contexte de fatigue en vue d'orienter les décisions des gestionnaires dans ce domaine.*

## 1. INTRODUCTION

Le vieillissement des ouvrages hydrauliques en France et dans le monde contraint les gestionnaires à choisir entre plusieurs scénarios : prolongation de la durée de vie, réparations, renforcements, voire remplacement complet. Les enjeux financiers sont souvent très élevés, compte tenu des coûts de fabrication, de construction et des pertes d'exploitation durant les arrêts. Les gestionnaires demandent donc autant d'informations que possible pour évaluer la durée de vie résiduelle et le niveau de risque associé à chacun des scénarios susmentionnés. Dans le cas des structures métalliques mécanosoudées telles que les turbines ou les portes d'écluse, il est crucial de caractériser la vulnérabilité des assemblages et la durée de vie résiduelle (DVR) des ouvrages hydrauliques.

### 1.1. Objectif de la chaire Medelia

L'entreprise de mécanique appliquée SPRETEC, membre du groupe Artelia, a lancé la chaire de recherche Medelia avec la Fondation INP et le soutien de deux laboratoires de mécanique (3SR et SIMaP) de l'Université Grenoble Alpes (UGA). L'objectif de cette chaire industrielle est de développer des connaissances sur la fatigue, la rupture et la durabilité des structures hydromécaniques, pour une période initiale de quatre ans (2023-2026).

Dans le domaine des aménagements hydrauliques, des exploitants tels que la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), Electricité de France (EDF) ou les Voies Navigables de France (VNF) font face à un taux croissant de problèmes liés au vieillissement de leurs équipements, en particulier du fait de la fatigue. Cela s'explique par le fait que les industries se sont fortement développées dans les deux ou trois décennies suivant la Seconde Guerre mondiale ; amenant l'équipement à atteindre aujourd'hui 50 à 60 ans d'utilisation. Cette problématique prévaut dans les secteurs tels que le nucléaire, l'hydraulique, ou le génie civil.

Dans le domaine de l'hydromécanique, les changements dans les conditions d'exploitation peuvent également entraîner des coûts non initialement anticipés (Savin et al. 2020). Les phénomènes de vibration liés aux machines ou aux effets hydrodynamiques peuvent également provoquer une défaillance par fatigue. Enfin, le changement climatique et ses effets (sécheresses, inondations plus fréquentes et plus importantes, températures élevées, etc.) pourraient également engendrer une plus grande variabilité des conditions de charge des équipements. Les matériels concernés comprennent les portes d'écluses, les conduites forcées, les vannes, turbines, réservoirs, etc. Dans un premier temps, nous nous concentrons sur des structures mécano-soudées telles que les portes d'écluses, mais l'objectif de la chaire est de développer une méthodologie qui puisse être appliquée à d'autres types d'équipements.

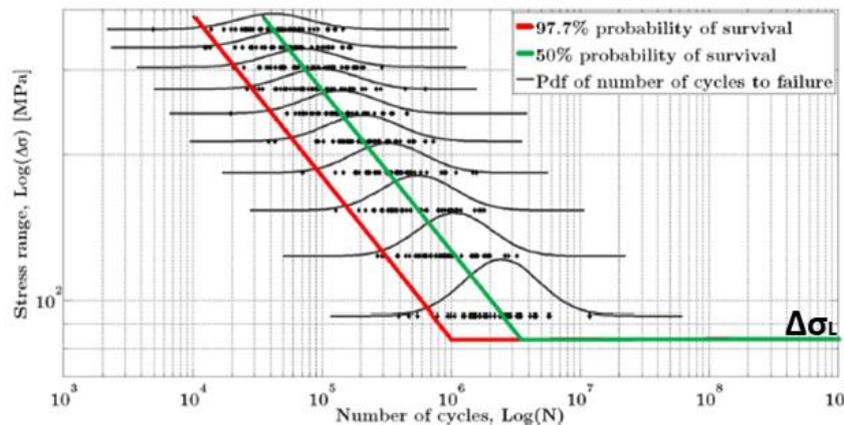
### 1.2. Analyses en fatigue probabilistes

Les calculs de fatigue réalisés dans la pratique sont généralement basés sur des modèles aux éléments finis et sur un post-traitement normatif des contraintes cycliques : Eurocode 3 (EC3, 2005), CODAP (2005), etc. Ces calculs en fatigue aboutissent à des estimations d'endommagement cumulatif, traduisant un niveau de dégradation indicatif. Ces estimations sont entachées d'incertitude à divers niveaux. On relève de manière non exhaustive :

- ◆ L'historique des chargements cycliques (voire vibratoires) des matériels, fourni par les gestionnaires (nombre de cycles quotidien, niveau de retenue, contraintes thermiques, vibrations, phénomènes dynamiques et vibratoires...);
- ◆ Caractéristiques matérielles (aux échelles des matériaux et des structures : qualité des réalisations, limites de fatigue des matériaux, rugosité, contraintes résiduelles...);

- ◆ Géométriques : apparition de fissures ou défauts, réduction d'épaisseur à la suite de corrosion, tolérances de fabrication ;
- ◆ Conditions aux limites : raideur des assemblages, contact non linéaire, glissements... ;
- ◆ Méthode de calcul en fatigue (estimation de dommages, de durée de vie, de probabilité de défaillance...), etc.

Dans ce contexte, estimer la durée de vie résiduelle (DVR) en fatigue pour des ouvrages métalliques reste incertain malgré les nombreuses études de fatigue existantes sur les structures en acier. La Figure 1 représente l'évolution de l'amplitude de contrainte appliquée au système mécanique en fonction du nombre de cycles à rupture, dont on peut déduire une durée de vie (résiduelle) en service. Les courbes rouges et vertes sont appelées courbes S-N "Stress vs Number of cycles", courbes de fatigue ou courbes de Wöhler.



**Figure 1.** Variation de l'amplitude de contrainte à la défaillance en fonction du nombre de cycles (courbe S-N ou de Wöhler), illustrant les fonctions de densité de probabilité des durées de vie de conception, ainsi que les quantiles à 2,3 % et 50 %, correspondant respectivement aux probabilités de 97,7 et 50 % d'une durée de vie plus longue (de Rocher et al., 2020).  $\Delta\sigma_L$  représente la limite d'endurance en fatigue.

Le principe du calcul de fatigue probabiliste consiste à enrichir le calcul de fatigue en tenant compte d'incertitudes. Sur la Figure 1 sont tracées les fonctions de densité de probabilité des nombres croissants de cycles jusqu'à la défaillance (c'est-à-dire la durée de vie en service), montrant les probabilités de dépasser une durée de vie cible (Rocher et al. 2020), qui peuvent être mises à jour après inspection, par exemple dans le cas des structures offshores, en prenant en compte les données d'inspection (DNV, 2015, in van Jole, 2016).

Un nombre limité de publications se sont penchées sur l'évaluation de la fatigue des portes d'écluses en utilisant des modèles aux éléments finis stochastiques, par exemple (Ramancha et al., 2022) et (Estes et al., 2004). L'étude de la fatigue des rivets fait également l'objet de travaux récents (Jiang et al., 2017). Ce type d'étude met en évidence les facteurs d'influence en accordant une priorité à leurs effets sur la durée de vie en fatigue. Certaines recherches utilisent également une approche bayésienne, c'est-à-dire qu'elles prennent en compte de nouvelles observations au fil du temps pour mettre à jour les prévisions.

Dans la suite, cet article présente d'abord la stratégie de la Chaire Medelia, avant de présenter le cadre méthodologique à appliquer. Enfin, quelques résultats préliminaires sont proposés.

### 1.3. Stratégie de la chaire Medelia

Les règles de calcul de fatigue de type Eurocode ne sont pas parfaitement adaptées aux structures anciennes. En effet, les courbes S-N réglementaires, bien que réputées conservatrices (probabilité de survie de 97,7% par analogie avec la Figure 1), sont conçues pour des structures répondant aux exigences contemporaines (notamment conformes à la norme EN 1090). Une méthode d'évaluation a été proposée par le centre commun de recherche européen (CCR, 2008) et récemment adoptée par le CETIM dans ses recommandations (Depale B & Bennebach, 2020). Conformément à ce cadre, nous souhaitons aller au-delà des règles de l'Eurocode en proposant une méthodologie alternative basée sur les axes suivants :

- Affiner les critères de fatigue en étudiant les effets de paramètres non pris en compte dans l'Eurocode : on peut envisager, par exemple, les nuances d'acier, la qualité des soudures, la rugosité, la corrosion, la contrainte moyenne, le signe de la contrainte (partiellement pris en compte dans l'Eurocode), le niveau de fiabilité requis, les contraintes résiduelles, etc. Brand et al. (1999), par exemple, rassemblent des études paramétriques intéressantes qui devraient être utilisées et complétées.
- Enrichir les calculs avec des approches probabilistes de la fatigue. Les courbes de Wöhler de l'Eurocode sont établies pour un certain niveau de fiabilité, généralement non remis en question. Une approche probabiliste des paramètres influents peut également enrichir l'analyse de la fatigue.
- Les calculs de mécanique de la rupture sur les points faibles d'une structure pourraient également enrichir et compléter les points précédents, notamment en évaluant l'influence de la présence d'une fissure sur un détail constructif.

Ces axes de travail préliminaires sont susceptibles d'évoluer au cours de la chaire, dans le but de servir au mieux l'objectif de développer des outils complémentaires de calcul de fatigue pour aider les opérateurs à prendre les bonnes décisions.

## 2. METHODOLOGIE PROPOSÉE

Divers types de couplage sont envisageables pour parvenir à une caractérisation probabiliste, avec des niveaux de précision variés. Ces couplages dépendent du coût des modèles numériques impliqués ou du niveau de non-linéarité de ces modèles. Ils dépendent également de la faisabilité pratique de mettre en œuvre un couplage mécanique-probabiliste. L'analyse de fatigue planifiée s'appuie sur l'expertise des membres de la chaire : modèles analytiques et aux éléments finis développés par SPRETEC, méthodes d'éléments finis stochastiques (EFS) et de mécanique de la rupture développées par les titulaires de la chaire. Nous nous concentrons particulièrement sur une approche EFS à deux échelles (assemblages et structure) pour caractériser la durée de vie résiduelle, avant de proposer une étude préliminaire en fatigue d'un assemblage mécano-soudé d'une porte d'écluse.

### 2.1. Une stratégie de modélisations aux éléments finis stochastiques à deux échelles

La méthodologie est résumée dans la Figure 2, dans le but de formaliser le cadre de notre travail en définissant de manière arbitraire nos modèles de calcul, analytiques ou aux éléments finis (EF), à l'échelle d'un assemblage ou structure en acier, sous la forme d'un modèle  $M$ , une fonction de transfert entre un vecteur de paramètres d'entrée  $x$  et une réponse mécanique  $y$ . Le cadre central en gris clair décrit la pratique actuelle dans les bureaux d'études : basée sur des hypothèses de modélisation (matériaux, géométrie, conditions aux limites, charges, etc.), le vecteur  $x$  des paramètres descriptifs de la structure est défini. Ce vecteur alimente l'étude mécanique, qui peut faire appel à une série de calculs et modèles (analyse numérique analytique). Par exemple, à l'échelle d'un assemblage mécano-soudé donné, pour une direction principale donnée, la contrainte maximale est une

composante de  $y$ , associée à la courbe de fatigue "S-N" de l'Eurocode 3, conduisant à l'estimation d'un nombre de cycles avant défaillance  $N$ , ainsi qu'à un dommage élémentaire  $d$ . À partir de cela, nous pouvons déduire la durée de vie résiduelle (DVR) en fonction d'un scénario d'exploitation pour la structure concernée. Le vecteur  $x$  est décomposé en deux sous-vecteurs  $x_1$  et  $x_2$ ,  $x_2$  modélisant les paramètres qui peuvent contribuer à la correction de la courbe de fatigue. Les paramètres  $x_1$ , qui ont un impact sur le comportement mécanique, concernent :

- i. Les chargements : niveau d'eau (pour une porte d'écluse), thermiques (données de modèles thermiques ou mesures), vibrations (données de mesures et/ou modèles FE), frottement (issues de la littérature et/ou mesures), poids, etc.
- ii. La géométrie : dimensions de construction, comme l'épaisseur des plaques d'acier, l'épaisseur des soudures (tolérances de fabrication, observations/mesures sur site, ...), etc.
- iii. Les caractéristiques mécaniques : module de Young, contrainte à la rupture (limite d'élasticité), voire résistance ultime (résistance maximale), etc.

Ces paramètres  $x_1$  sont ceux qui alimentent le modèle  $M$  et sont plus ou moins bien connus. Chacun d'eux peut être modélisé par une variable aléatoire basée sur une valeur moyenne et un écart-type obtenus en rassemblant des données auprès des opérateurs, d'observations sur site, de la littérature scientifique et technique, de données fictives, etc.

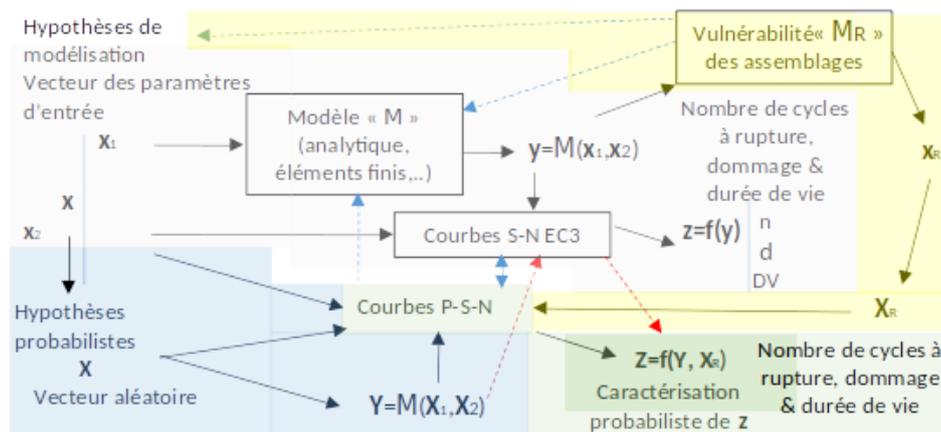


Figure 2. Stratégie probabiliste de l'analyse à la fatigue proposé au sein de la chaire Medelia.

Le vecteur  $x_2$  sert également à représenter les paramètres qui affectent les courbes de Wöhler (courbes P-S-N) :

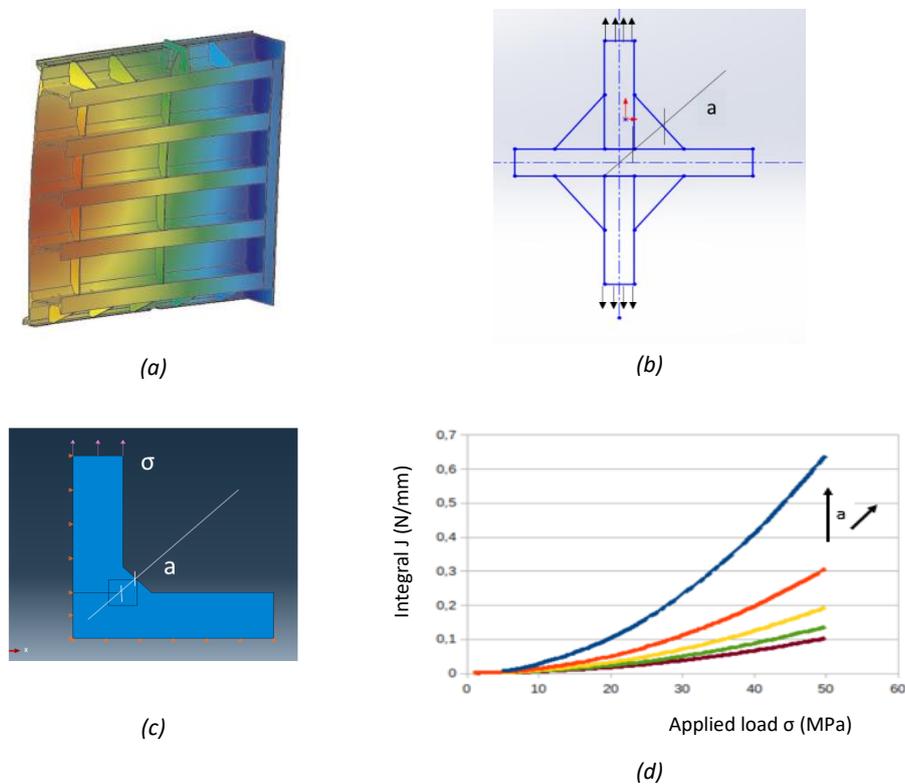
- ◆ Caractéristiques du matériau (littérature et/ou mesures sur site et/ou avis d'expert) ;
- ◆ Observations principalement sur site : qualité de la soudure, rugosité, corrosion... ;
- ◆ À partir des modèles  $M$  ou des mesures : contrainte moyenne, signe de contrainte ;
- ◆ Objectif de fiabilité...

Le cadre bleu concerne l'utilisation d'hypothèses probabilistes et de modélisation ad-hoc, de sorte que les paramètres  $x$  peuvent être modélisés à l'aide d'un vecteur aléatoire  $X$ , en tant qu'entrée du modèle  $M$ , conduisant à un vecteur de réponse  $Y$ . À partir de cette réponse, l'utilisation de courbes de fatigue réglementaires (flèche rouge en pointillés) permet la caractérisation probabiliste de la sortie  $z$  modélisée à l'aide d'un vecteur aléatoire  $Z = (N, d, DV)$ . Des courbes de fatigue probabilistes (P-S-N) peuvent également être définies. Le cadre jaune montre l'utilisation de la modélisation à l'échelle des assemblages identifiés comme vulnérables à la fin du calcul  $M$ , avec ou sans fissures. La mécanique de la rupture permet une caractérisation plus détaillée de la nocivité de la fissure. À la fin de cette étude,  $x_R$  représente des informations telles que les taux d'énergie de déformation dissipée ou les facteurs d'intensité de contrainte, qui pourraient être utilisés pour réviser le modèle  $M$ , ou les courbes de fatigue.

Le cadre vert en bas à droite reflète le résultat combiné des approches de la mécanique de la rupture et de la modélisation probabiliste  $Z$ , conduisant à une caractérisation de la DVR : Les moments statistiques (moyenne, variance), l'intervalle de confiance, la fonction de densité de probabilité (PDF), les fonctions de distribution cumulative (CDF) peuvent alors être déduits.

## 2.2. Application à l'étude d'une porte d'écluse

La Figure 3a présente une vue d'ensemble de la moitié d'une porte d'écluse, modélisée à l'aide d'un modèle d'éléments finis (Ansys, 2021). Pour des raisons de confidentialité, seules quelques caractéristiques sont fournies. À partir des calculs par éléments finis, certaines connexions présentant des contraintes plus élevées sont identifiées. La Figure 3b représente une description locale de l'un de ces assemblages, entre les panneaux verticaux et horizontaux. En raison du procédé de mise en œuvre du soudage, une région horizontale initiale n'est pas soudée et agit comme une fissure initiale. Exploitant les symétries (verticale et horizontale), un quart de la région d'intérêt est pris en compte, soumis à une tension uniaxiale, le déplacement est fixé le long de la direction verticale pour tenir compte du plan de symétrie (Fig. 5c). Un modèle EF à l'échelle de l'ensemble est construit (Abaqus, 2023).



**Figure 3.** Vue d'ensemble de la moitié d'une porte d'écluse (a) avec un accent sur une connexion soudée (b), une description réduite (c) et le calcul de la charge agissant sur la fissure en fonction de l'épaisseur soudée a (d).

Dans la figure 3d, le niveau de charge en termes d'intégrale J par rapport à la contrainte à distance  $\sigma$  prescrite sur le dessus du panneau vertical est rapportée, par rapport à l'épaisseur  $a$  de la région soudée (longueur oblique dans la figure 3b et 3c. Cette intégrale J (Rice, 1968) caractérise le niveau de charge sur la fissure et correspond au taux de restitution d'énergie de déformation. Nous observons que l'augmentation de l'épaisseur de soudage induit une augmentation de la charge agissant sur la fissure (intégrale J). Comme cette épaisseur  $a$  peut-être variable, cela engendre une charge probabiliste à considérer par la suite.

### 2.2.1. Calcul en fatigue selon l'Eurocode

Le calcul de dommage cumulatif selon l'Eurocode 3 (EC3) est une méthode visant à évaluer les dommages progressifs des structures en acier soumises à des charges répétées. Cette approche implique le calcul du niveau de dommage cumulatif à chaque point de la structure, intégrant les effets des cycles de chargement répétés. Le calcul repose sur le concept de durée de vie résiduelle (DVR), définie comme la durée de service restante de la structure avant d'atteindre un niveau prédéfini de dommage. Cette durée de service résiduelle est déterminée en comparant le niveau de dommage cumulé à chaque point de la structure avec la limite de dommage autorisée correspondante. Le dommage cumulé est défini tel que  $d = \sum \frac{n_i}{N_i}$ , avec  $N_i$  le nombre total de cycles jusqu'à la défaillance et  $n_i$  le nombre des cycles passés, où  $i \in [1, r]$ ,  $r$  est le nombre de contraintes principales appliquées à chaque assemblage. Soit  $\Delta\sigma$  l'amplitude de contrainte,  $\Delta\sigma_L$  la limite d'endurance en fatigue (voir Fig. 1), et  $\Delta\sigma_P$  l'amplitude de contrainte pondérée.

$$\Delta\sigma_P = \gamma_{Ff} \cdot \frac{1}{K_s} \cdot \gamma_{MF} \cdot \Delta\sigma \quad (1)$$

Avec les coefficients de sécurité partiels  $\gamma_{Ff}$  et  $\gamma_{MF}$ , le coefficient de réduction  $K_s$  en raison de l'effet de dimension lorsque l'épaisseur des plaques  $e > 25 \text{ mm}$  (7.2.2, EC3, 2005), tel que

$$K_s = \left(\frac{25}{e}\right)^{0.25} \quad (2)$$

Le nombre total  $N_i$  de cycles de chargements jusqu'à la défaillance est ensuite calculé de la manière suivante,

$$\begin{aligned} & \text{if } \Delta\sigma_P < \Delta\sigma_L \text{ then } N_i \rightarrow \infty \\ & \text{if } \Delta\sigma_L < \Delta\sigma_P < \Delta\sigma_D \text{ then } N_i = 5 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_P}\right)^5 \\ & \text{if } \Delta\sigma_D < \Delta\sigma_P \text{ then } N_i = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_P}\right)^3 \end{aligned} \quad (3)$$

Où,  $\Delta\sigma_C$  représente la valeur de référence de la résistance à la fatigue pour  $N_C = 2 \cdot 10^6$  millions de cycles et  $\Delta\sigma_D$  est la limite de fatigue pour des amplitudes de contrainte constantes, pour un nombre de cycles  $N_D$ . Nous fixons arbitrairement  $n_i$  à 255 000 cycles de charge (durée de vie passée de la porte),  $\gamma_{Ff} = 1$ ,  $\gamma_{MF} = 1.35$ , et l'épaisseur  $e$  atteint 40 mm (Michaud, 2021). Pour un tel nombre de cycles, un endommagement cumulé significatif a été constaté (Michaud, 2021). L'idée est de compléter cet indicateur initial en utilisant des analyses probabilistes et la mécanique de la rupture.

### 2.2.2. Analyse probabiliste préliminaire d'un assemblage soudé

Les niveaux amont et aval font partie des facteurs fondamentaux dans l'analyse en fatigue d'une porte d'écluse. La variabilité de ces niveaux et notamment le niveau aval peut être grande (variabilité quotidienne, hebdomadaire, saisonnière). Ainsi une analyse probabiliste des niveaux permet d'enrichir le calcul de la durée de vie résiduelle de la porte écluse.

Plus précisément, dans le cas des structures mécano-soudées comme les portes d'écluses, les variations du niveau d'eau influent directement les contraintes appliquées aux soudures. Ces fluctuations induisent des variations de contrainte, avec des conséquences potentielles sur la durabilité et la résistance structurelle de ces composants.

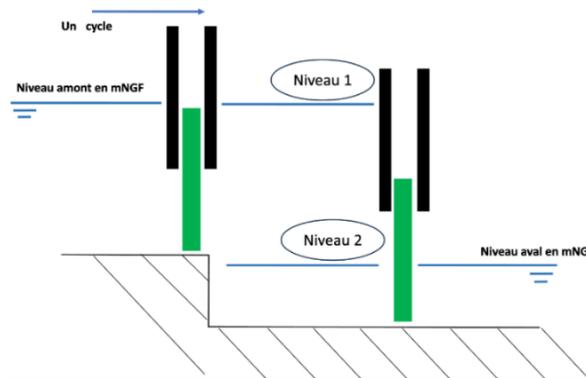


Figure 4. Cycle hydraulique d'une porte d'écluse : Variations de niveaux d'eau et forces hydrostatiques lors du transit d'un bateau.

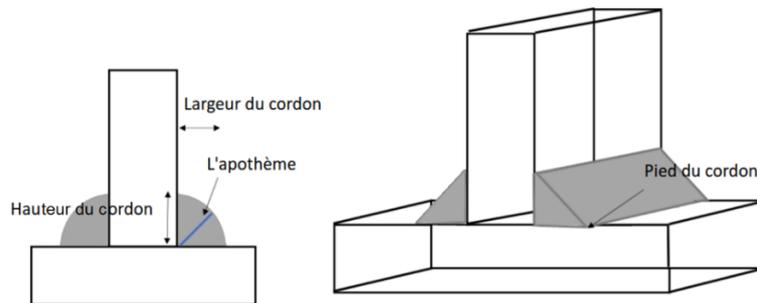


Figure 5. Schéma d'un assemblage soudé sur la porte écluse.

Pour garantir l'intégrité structurelle face à ces charges variables, une analyse de contraintes approfondies, s'avère impérative.

Une analyse approfondie aux éléments finis peut être menée en utilisant le modèle EF de la porte d'écluse. Dans cette première présentation méthodologique, nous nous intéressons simplement à la variation de la contrainte  $\Delta\sigma$ , due aux chargements générés par la variation du niveau d'eau, transmise à la soudure, modélisée à l'aide d'une variable aléatoire gaussienne, avec un coefficient de variation de 10 %. En propageant cette variabilité à travers l'ensemble des équations (3) à l'aide d'une simulation Monte-Carlo, la Figure 6 présente la fonction de densité de probabilité (PDF) et la fonction de répartition (CDF) résultantes du nombre de cycles de chargement jusqu'à la défaillance. De ce graphique, on peut déduire que la probabilité de défaillance pour la durée de vie passée de la porte ( $2,55 \times 10^5$  cycles) conduit déjà à environ 10 %, confirmant ainsi la nécessité de réparer au moins l'assemblage concernée, sans durée de vie résiduelle acceptable.

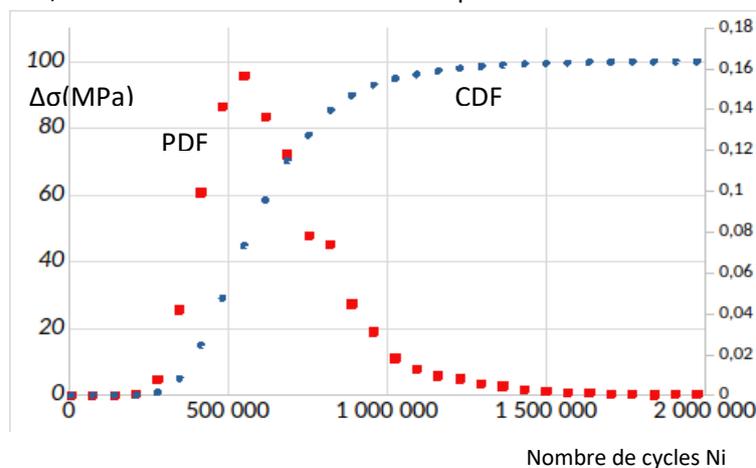


Figure 6. Fonction de répartition (CDF : cumulative distribution function) et fonction de densité de probabilité (PDF : probability density function) du nombre de cycles jusqu'à la défaillance de l'assemblage. La ligne verticale en pointillés indique que la durée de vie en service passée entraîne déjà une probabilité de défaillance de 10%, ce qui semble déjà élevé pour prévoir une durée de vie résiduelle.

### 2.2.3. Analyse de propagation de fissure dans un assemblage soudé

Un modèle de propagation de fissure est réalisé. La description du modèle et des conditions aux limites est présentée dans la Figure 7, qui présente comment une propagation de fissure peut être modélisée avec des zones cohésives insérées en direct "en temps réel" avec des nœuds fantômes (Abaqus, 2023). Les paramètres de rupture sont le taux de restitution d'énergie  $G_C = 10 \frac{J}{m^2}$  et la résistance maximale  $T_{max} = 100MPa$ , à des fins illustratives, les propriétés élastiques étant celles d'un acier standard avec un module d'Young  $E = 200GPa$  et  $\nu = 0.3$ . Dans le cas d'une traction en haut du panneau vertical, le calcul montre comment la fissure se propage avec une trajectoire de fissure inclinée (Fig. 5). En utilisant cette méthode, l'assemblage étudié de la porte d'écluse est également modélisé.

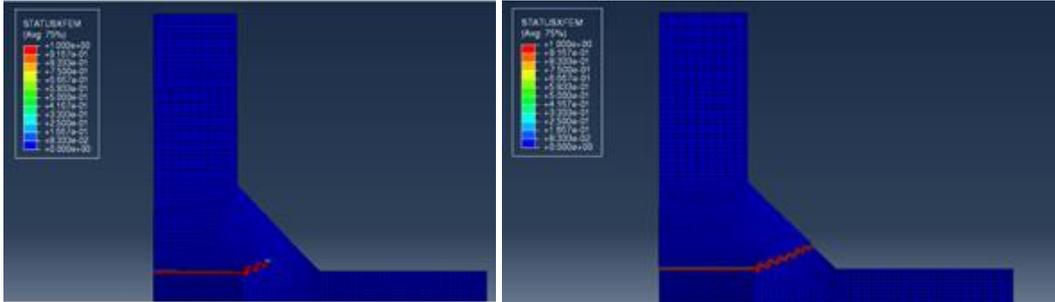


Figure 7. Modèles d'éléments finis de l'assemblage et prédiction de la trajectoire de fissuration sous tension sur la plaque verticale.

Une méthode de collocation stochastique (Baroth et al., 2007) est employée pour propager la variabilité de charge de 10 % à travers le modèle EF. En conséquence, la Figure 8a présente les PDF et CDF du taux de libération d'énergie par déformation (intégrale J). On peut déduire de ce graphique un intervalle de confiance à 90 %, défini par les limites correspondant aux quantiles de 5 % et 95 %, correspondant à des valeurs de J d'environ 20 et 55 N/mm respectivement. Ce graphique peut également être interprété comme signifiant que la probabilité de dépasser 55 est de 5 %, ce qui pourrait être considéré comme une « valeur caractéristique » de J, telle que définie dans les Eurocodes (ECO, 2002).

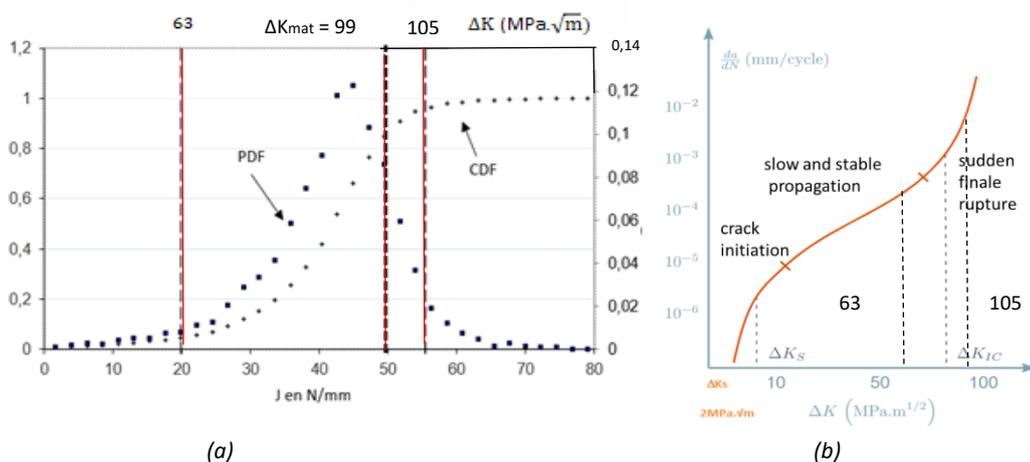


Figure 8. Caractérisation de la sévérité de la fissure de l'assemblage : Fonction de densité de probabilité (PDF) et de répartition (CDF) de l'intégrale J (a) ; Évolution de la loi de Paris (b).

Dans ce travail, nous soulignons que cette distribution  $J$  peut également être utilisée pour estimer une plage de facteurs d'intensité de contrainte correspondante ( $\Delta K$ ), en se remémorant la relation bien connue entre  $J$  et  $\Delta K$ , ainsi que le module de Young  $E$ .

$$\Delta K = \sqrt{JE} \quad (4)$$

En effet, on déduit que l'intervalle de confiance à 90% sur les facteurs d'intensité de contrainte est d'environ  $[63; 105] \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Cette plage peut être comparée à l'évolution de la vitesse de propagation de la fissure estimée par la loi de Paris, fournissant le taux de croissance d'une fissure due à la fatigue.  $\frac{da}{dN}$  représente la vitesse de propagation de fissure. Les coefficients matériels  $C$  et  $m$  peuvent être obtenus expérimentalement et dépendent également de l'environnement, de la fréquence, de la température et du rapport de contrainte.

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad (5)$$

En considérant les conditions opérationnelles de la porte d'écluse et en utilisant la norme britannique (BS 7910, 2019), nous élaborons l'évolution présentée dans la Figure 8b, définissant trois zones : avant l'initiation de la fissure, la propagation lente et stable, et une rupture soudaine et brutale. Ces trois zones sont délimitées par deux valeurs de facteur d'intensité de contrainte,  $\Delta K$  et  $\Delta K_{IC}$ , estimées ici à environ 2 et  $99 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  respectivement. L'intervalle de confiance à 90% de la Figure 8a a été repris dans la Figure 8b, incluant la plage critique du facteur d'intensité de contrainte  $\Delta K_{IC}$  de  $99 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . En revenant à la fonction de répartition de la Figure 8b, on peut lire une probabilité de dépasser  $\Delta K_{IC}$  de 10%, entraînant une rupture soudaine et finale.

### 3. CONCLUSIONS

Cet article a présenté la chaire Medelia ainsi qu'un cadre préliminaire visant à contribuer à l'évaluation des dommages et de la durée de vie résiduelle des structures hydromécaniques. Un couplage mécano-probabiliste est proposé pour mieux comprendre le comportement de ces structures vieillissantes, dans le but d'aider les gestionnaires à décider de réparer ou non des assemblages ou des structures entières, et mettre en évidence les paramètres de conception cruciaux pour un meilleur contrôle futur. Jusqu'à présent, l'étude réglementaire permet d'estimer un indicateur de dommage cumulé, qui devrait être complété. Des études récentes soulignent, par exemple, qu'un indicateur unique de dommage n'est pas suffisant lorsque le niveau de dommage augmente, il est au moins utile de réaliser plusieurs estimations de dommage dans différentes conditions opérationnelles (Savin et al., 2021).

À titre d'illustration, un assemblage "critique" d'une porte d'écluse est étudié. D'un point de vue réglementaire déterministe, l'estimation des dommages alerte sur la nocivité de l'assemblage. La nouveauté de ce travail réside dans l'utilisation simultanée de la mécanique de la rupture et d'analyses probabilistes pour fournir deux indicateurs complémentaires du niveau de dommage de l'assemblage : la probabilité de dépasser la plage critique de l'intensité de contrainte et la distribution des cycles de chargement jusqu'à la défaillance.

## REMERCIEMENTS

Les travaux de la Chaire Medelia sur l'analyse en fatigue probabiliste de structures métalliques sont portés par la Fondation Grenoble INP grâce au mécénat du Groupe Artelia et de sa filiale SPRETEC.

Les travaux de recherche sont menés conjointement par deux laboratoires, à savoir le 3SR et le SIMap.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance envers la Fondation Partenariale Grenoble INP pour son soutien précieux, qui a joué un rôle déterminant dans le lancement et l'avancement de ce projet de recherche actuellement en cours. Nos remerciements vont également à l'Université Grenoble Alpes pour son soutien institutionnel. Ces partenariats ont été des piliers fondamentaux de notre travail, et nous sommes reconnaissants de leur contribution significative.

Les auteurs tiennent également à exprimer leur reconnaissance envers Hana Abidi et Bintou Coulibaly pour leurs contributions lors de leurs stages respectifs.

Il est important de souligner que, conformément aux termes de l'accord de la Chaire Medelia, la responsabilité du contenu de cette publication incombe uniquement à ses auteurs, et les partenaires de la Chaire ne peuvent en aucun cas être tenus responsables de son contenu.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Abaqus, Standard User's Manual, Version 2020.
- [2] Abidi H., Initiation à la fiabilité et à la fatigue probabiliste : Application aux portes d'écluses de navigation, Master thesis, ENSE3, 2023.
- [3] Ansys, Workbench, R1, 2021.
- [4] Baroth J., Chauvière C., Bressolette P., Fogli M., An efficient SFE method using Lagrange Polynomials: application to nonlinear mechanical problems with uncertain parameters. *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, n° 196, pp. 4419-4429, 2007.
- [5] Brand A, Flavenot J.F., Gregoire R., Tournier C. Technological data on fatigue, Senlis, CETIM ; 1999, 4e ed., 383 p.
- [6] BS 7910, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, 2019.
- [7] CODAP, code de construction des appareils à pression non soumis à la flamme, SNCT, 2005.
- [8] Coulibaly, B., Analyse de la nocivité de défauts de structures métalliques mécanosoudées, Mémoire de stage de fin d'études, Master 2 Génie Mécanique, Polytech'Lille, 2023.
- [9] Depale, B & Bennebach, M., Durée de vie résiduelle (DVR) des structures et équipements : problématique et applications aux appareils de levage / Residual Life of Structures and Equipment\_Problems and Application to Crane, CETIM, 2020.
- [10] DNV GL, "Probabilistic methods for planning of inspection for fatigue cracks in offshore structures," Recommended Practice, 2015.
- [11] Eggen, A.O., Belsnes, M. Operation related maintenance and reinvestment costs for hydropower scheduling. *Energy Syst* (2023).
- [12] EN 1990, Eurocode 0. 2002. Bases of Structural Design. Brussels : CEN.

- [13] EN 1993-1-9. Eurocode 3 : Design of steel structures - Part 1-9 : Fatigue [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC] ; 2005.
- [14] JRC, JRC43401, Assessment of Existing Steel Structures : Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life, EUR 23252 EN – 2008.
- [15] Michaud, V., Ecluse de Bollène, Fatigue de la porte aval, Notes de calcul, SPRETEC, 2021.
- [16] Rocher, B., Schoefs, F., François, M., Salou, A., Caouissin, A.L., A two-scale probabilistic time-dependent fatigue model for offshore steel wind turbines, International Journal of Fatigue 136 (2020) 105620.
- [17] Savin, O., Badina, C., Baroth, J., Charbonnier, S., Bérenguer, C. Start and stop costs for hydro power plants : a critical literature review. In : Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, 2020.
- [18] Savin, O., Baroth, J., Badina, C., Charbonnier, S., Bérenguer, C. : Damage due to start-stop cycles of turbine runners under high-cycle fatigue. Int. J. Fatigue 153, 106458 (2021).
- [19] Stefanou, G., 2009. The stochastic finite element method: Past, present and future. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 198, 1031–1051. doi: 10.1016/j.cma.2008.11.007.
- [20] Van Jole, J.A., Development of a Method for Assessment of the Remaining Fatigue Life of Steel Structures of Existing STS Cranes, master thesis, Delft university of technology, 2016.
- [21] Bonnet, P., Hermite, X., Huther, I., Lefebvre, F., *“Guide pour le choix d'une méthode d'essais de fatigue et de l'analyse statistique associée”*. Cetim, 2016.