



HAL
open science

Logiciel Persalys-Penstock pour l'estimation de la fiabilité des conduites forcées soumises à la corrosion : développements et applications

Philippe Bryla, Emmanuel Ardillon, Antoine Dumas, Anne Dutfoy-Lebrun

► To cite this version:

Philippe Bryla, Emmanuel Ardillon, Antoine Dumas, Anne Dutfoy-Lebrun. Logiciel Persalys-Penstock pour l'estimation de la fiabilité des conduites forcées soumises à la corrosion : développements et applications. Congrès Lambda Mu 23 " Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable " - 23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Institut de Maîtrise des Risques, Oct 2022, Paris, France. hal-03878042

HAL Id: hal-03878042

<https://hal.science/hal-03878042v1>

Submitted on 29 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Logiciel Persalys-Penstock pour l'estimation de la fiabilité des conduites forcées soumises à la corrosion: développements et applications

Bryla Philippe
EDF HYDRO DTG
134 Chemin de l'Etang,
38950 Saint Martin le Vinoux,
France
philippe.bryla@edf.fr

Ardillon Emmanuel
EDF R&D
6 Quai Watier,
78401 Chatou Cedex,
France
emmanuel.ardillon@edf.fr

Dumas Antoine
PHIMECA
34 Rue de Sarliève,
63800 Cournon d'Auvergne,
France
dumas@phimeca.com

Dutfoy-Lebrun Anne
EDF R&D
7, Boulevard Gaspard Monge,
91120 Palaiseau,
France
anne.dutfoy@edf.fr

Résumé — Un modèle mécano-probabiliste a été développé afin d'estimer la probabilité annuelle de défaillance d'un tronçon de conduite forcée soumis à des pertes d'épaisseur par corrosion. Ce modèle a été implémenté dans l'application dédiée Persalys-Penstock, qui utilise la librairie OpenTURNS et l'IHM Persalys. Après avoir décrit les principales fonctionnalités de l'application Persalys-Penstock, on expose quelques résultats obtenus sur la ruine par instabilité plastique (hors soudures) sur des plans d'expériences aléatoires de très grande dimension. Ces calculs permettent notamment d'estimer des quantiles de la probabilité annuelle de défaillance enveloppe. On présente également quelques études de sensibilité menées sur la ruine par rupture brutale ou mixte de défauts de type fissure (dans les soudures). Ces études permettent d'évaluer la dépendance de la probabilité annuelle de défaillance par rapport aux données d'entrée les plus influentes telles que le Facteur de Marge, la cinétique annuelle de corrosion, le niveau des contraintes résiduelles de soudage, la performance des Contrôles Non Destructifs mis en œuvre à la construction et la dispersion des pertes d'épaisseur, la pression d'épreuve hydraulique réalisée à la mise en service de l'ouvrage.

Mots-clefs — *conduite forcée, marge, probabilité de défaillance, corrosion*

Abstract — A structural reliability model has been developed for the estimation of the annual failure probability of a penstock section subjected to loss of thickness due to corrosion. This model has been implemented in the dedicated software Persalys-Penstock. This software uses the OpenTURNS library and the Persalys interface. After a short description of the main functions of Persalys-Penstock, a few results are presented concerning the failure by plastic collapse (out of welds) on very large random calculation grids. These calculations allow to estimate quantiles of the annual failure probability. Sensitivity analyses are also presented for the fragile or hybrid failure mode of welds with cracks. These studies allowed to evaluate the influence of several input parameters on the annual failure probability, especially the Margin Factor, the annual corrosion thinning, the level of residual welding stress, the performance of Non Destructive Testing, the scatter of loss of thickness and the hydro pressure test at commissioning.

Keywords — *penstock, margin, failure probability, corrosion*

I. INTRODUCTION

Les conduites forcées sont composées de tuyaux en acier dont la fonction est d'acheminer l'eau d'un barrage à une usine hydroélectrique.

EDF exploite plus de 500 conduites forcées (longueur totale supérieure à 300 km). Ces conduites forcées sont de différentes technologies, suivant leur époque de fabrication au cours du XXème siècle : tuyaux moulés, tuyaux rivetés, tuyaux soudés au gaz à l'eau, tuyaux mécano-soudés à l'arc, tuyaux frettés (par câbles ou par frettes rigides).

Ces ouvrages étant susceptibles de subir des pertes d'épaisseur sous l'effet de la corrosion, des diagnostics sont effectués régulièrement afin de statuer sur leur aptitude au service. Ces diagnostics reposent sur une visite de l'ouvrage comprenant des mesures d'épaisseur et sur l'estimation d'un Facteur de Marge. Ce Facteur de Marge, égal au rapport de la contrainte admissible sur la contrainte en service, est évalué à partir de valeurs de calcul de l'épaisseur résiduelle et de la limite de rupture du matériau généralement pris à $\gamma=2$ écarts-types de la moyenne.

Des résultats visant à vérifier la pertinence de ce choix de quantile avaient déjà été présentés en 2018 [1]. Cette première étude reposait sur une approche mécano-probabiliste consistant à évaluer le risque d'instabilité plastique en modélisant les incertitudes et dispersions sur l'épaisseur nominale, les pertes d'épaisseur par corrosion et les caractéristiques matériaux.

En 2020 [2], une généralisation des résultats de cette étude a été présentée avec un modèle permettant la prise en compte des défauts de type fissure dans les soudures et l'évaluation de l'impact d'une épreuve hydraulique sur la probabilité de défaillance.

Ces différents modèles ont été intégrés dans le logiciel Persalys-Penstock qui est présenté dans le présent article. On expose les principales fonctionnalités du logiciel et ses performances de calcul. Quelques résultats remarquables sont également présentés, notamment les résultats issus d'un plan d'expériences aléatoire de grande taille dans le cas de

l'instabilité plastique (hors soudures), ainsi que les résultats d'études de sensibilité par rapport à quelques paramètres clefs dans le cas de la mécanique de la rupture (dans les soudures).

On décrit les deux utilisations possibles de l'application Persalys-Penstock : d'une part l'évaluation d'un niveau de probabilité de défaillance pour une configuration donnée de conduite forcée pour laquelle les incertitudes sur les données d'entrée sont quantifiées, d'autre part l'évaluation de probabilités de défaillance enveloppes pour des catégories de conduites forcées en vue d'élaborer des abaques génériques de cotation de l'occurrence de défaillance dans des études de risques quantitatives ou semi-quantitatives.

II. MODELES PROBABILISTES D'EVALUATION DES CONDUITES FORCEES EN ACIER

A. Facteur de Marge et principales grandeurs associées

1) Facteur de Marge

L'évaluation de l'aptitude au service d'une conduite forcée nécessite habituellement d'estimer un Facteur de Marge déterministe (noté FM) calculé comme suit :

$$FM = \frac{f}{\sigma_c^*} \quad (1)$$

f désigne la contrainte admissible et σ_c^* désigne la contrainte circonférentielle maximale de calcul s'appliquant en service à la paroi de la conduite forcée. Ce Facteur de Marge est évalué en appliquant des valeurs de calcul déterministes pour l'épaisseur résiduelle (notée e^*), la résistance à la rupture de l'acier (notée σ_u^*) et la limite d'élasticité (notée σ_y^*). La conduite forcée est jugée apte au service dès lors que le Facteur de Marge FM est supérieur ou égal à 1.

2) Caractéristiques matériaux et contrainte admissible

On note respectivement σ_y et σ_u la limite d'élasticité de l'acier et sa limite de rupture pour un tuyau donné. À l'échelle d'un tronçon ou d'une conduite forcée dans son ensemble, σ_u et σ_y présentent des dispersions. La contrainte admissible est habituellement définie comme une fonction d'un quantile de ces grandeurs. En notant respectivement σ_y^* et σ_u^* ces quantiles, la contrainte admissible servant à calculer le Facteur de Marge est définie comme suit :

$$f(\sigma_y^*, \sigma_u^*) = \min \left(\frac{\sigma_y^*}{1,5}, \frac{\sigma_u^*}{2,4} \right) \quad (2)$$

Dans l'équation (2), les coefficients de sécurité 1,5 et 2,4 sont ceux habituellement pris à la conception (voir [7]).

Pour l'ensemble des aciers de construction, nous observons une corrélation linéaire générale moyenne entre σ_y et σ_u . Toutefois, une nuance donnée d'acier relative à un tronçon de conduite forcée peut s'écarter de la corrélation générale. C'est pourquoi nous avons introduit une variable ε qui permet de modéliser la distribution de cet écart : voir Eqs. (3.a) et (3.b). En pratique, la moyenne $\mu(\varepsilon)$ dépend de la nuance d'acier, une nuance d'acier donnée pouvant s'écarter de la corrélation générale entre σ_u et σ_y , l'écart-type $\sigma(\varepsilon)$ égal à la dispersion de σ_y sachant σ_u étant proportionnel à σ_y .

$$\sigma_y = A \cdot \sigma_u - B + \varepsilon \quad (3.a)$$

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma(\sigma_y | \sigma_u) = \omega \cdot \mu(\sigma_y) \quad (3.b)$$

3) Épaisseur résiduelle et épaisseur de calcul

Dans la suite, nous considérons l'épaisseur résiduelle e_N d'un tuyau à l'année N, puis e_{N+1} à l'année N+1, $e_{N+1} - e_N$ étant égale à la perte annuelle d'épaisseur, notée $\Delta e_{annuelle}$.

Or, comme l'illustre la Fig. 1 et les équations (4.a) et (4.b) ci-après, on peut décomposer l'épaisseur résiduelle d'un tuyau à l'année N en une somme de 3 termes, e_{nom} désignant l'épaisseur nominale, Δe_{appro} la surépaisseur d'approvisionnement à la construction (généralement positif) et Δe_{corr} la perte d'épaisseur due à la corrosion cumulée à l'année N depuis la mise en service de la conduite forcée :

$$e_N = e_{nom} + \Delta e_{appro} - \Delta e_{corr} \quad (4.a)$$

$$e_{N+1} = e_{nom} + \Delta e_{appro} - \Delta e_{corr} - \Delta e_{annuelle} \quad (4.b)$$

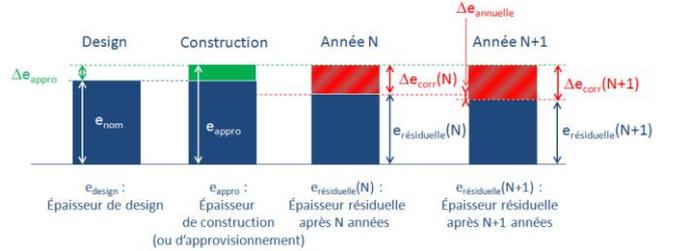


Fig. 1. Décomposition de l'écart à l'épaisseur nominale

Pour un tuyau donné, la contrainte circonférentielle de membrane en service à l'année N peut s'exprimer analytiquement suivant, où e_N désigne son épaisseur résiduelle à l'année N, R son rayon et $P_{service}$ la pression maximale de service :

$$\sigma_c(N) = \frac{P_{service} \cdot R}{e_N} \quad (5)$$

À l'échelle d'un tronçon ou de la conduite forcée, Δe_{appro} et Δe_{corr} présentent des dispersions qui peuvent être approchées par des variables aléatoires, généralement normales ou log-normales.

La contrainte σ_c^* de calcul est calculée pour un quantile, $Q_{x\%}$ de l'épaisseur résiduelle.

Pour un tuyau particulier d'une conduite forcée subissant des pertes d'épaisseur par corrosion, on choisit d'exprimer la contrainte circonférentielle à l'année N, puis à l'année N+1 comme suit :

$$\sigma_{c,N} = \frac{f \cdot (e_{nom} - \Delta e^*)}{FM \cdot (e_{nom} + \Delta e_{appro} - \Delta e_{corr})} \quad (6)$$

$$\sigma_{c,N+1} = \frac{f \cdot (e_{nom} - \Delta e^*)}{FM \cdot (e_{nom} + \Delta e_{appro} - \Delta e_{corr} - \Delta e_{annuelle})} \quad (7)$$

Où e_{nom} , Δe_{appro} , Δe_{corr} et $\Delta e_{annuelle}$ désignent respectivement l'épaisseur nominale de la paroi, la surépaisseur à la construction, la perte d'épaisseur constatée à l'année N et la perte d'épaisseur annuelle dans un tuyau particulier. FM correspond au Facteur de Marge calculé à l'année N. ces expressions présentent l'avantage de ne faire intervenir que le Facteur de Marge, sans faire intervenir explicitement ni le rayon R des tuyaux ni la pression de service $P_{service}$.

B. Modèle de ruine par instabilité plastique

1) Variables aléatoires

Compte-tenu des dispersions et incertitudes affectant les différentes grandeurs caractérisant l'état d'un tronçon de conduite forcée, nous avons retenu au total quatre variables aléatoires pour décrire ces aléas.

La TABLE I. récapitule ces quatre variables aléatoires prises en compte dans le modèle mécano-probabiliste de ruine par instabilité plastique. Dans la suite, $X = \{\sigma_u, \Delta e_{appro}, \Delta e_{corr}, \varepsilon\}$ désigne le vecteur de variables aléatoires.

TABLE I. VARIABLES ALEATOIRES DU MODELE DE DEFAILLANCE PAR INSTABILITE PLASTIQUE

Variable	Description	Distribution
σ_u	Résistance à la rupture	Normale ou log-normale
Δe_{appro}	Surépaisseur de fabrication	Normale ou log-normale
Δe_{corr}	Amincissement par corrosion	Normale ou log-normale
ε	Écart à la corrélation générale $\sigma_y - \sigma_u$	Normale

2) Critère de ruine

Dans ce premier modèle probabiliste concernant les zones hors soudures, le mécanisme de défaillance considéré est le dépassement d'une contrainte d'écoulement (notée σ_f) par la contrainte circonférentielle en service.

Pour cela, un critère légèrement plus conservatif que celui de l'annexe G de la norme BS-7910 [5] a été pris en compte :

$$\sigma_f = \min\left(\frac{\sigma_y + \sigma_u}{2}; 0,85 \cdot \sigma_u\right) \quad (8)$$

Afin d'exprimer la fonction d'état limite de façon indépendante du diamètre des tuyaux et de la pression maximale de fonctionnement, celle-ci a pu être formulée de la façon suivante :

$$G(FM, \mathbf{X}) = \sigma_f - \frac{f \cdot (e_{\text{nom}} - \Delta e^*)}{FM \cdot (e_{\text{nom}} + \Delta e_{\text{appro}} - \Delta e_{\text{corr}})} \quad (9)$$

où FM désigne le Facteur de Marge et \mathbf{X} le vecteur des variables aléatoires.

C. Modèle de ruine généralisé en mécanique de la rupture

1) Variables aléatoires

Dans les soudures longitudinales des tuyaux, nous considérons l'existence de défauts de fabrication plans susceptibles de ne pas avoir été détectés par les Contrôles Non Destructifs (CND) mis en œuvre à la fabrication. C'est pourquoi un second modèle a été développé afin d'estimer la probabilité annuelle de rupture d'un tuyau affecté par une perte progressive d'épaisseur dans son joint soudé longitudinal. La Fig. 2 montre les 2 types de défauts susceptibles d'affecter les soudures et matérialise la surépaisseur d'approvisionnement et la perte d'épaisseur cumulée due à la corrosion à l'année N.

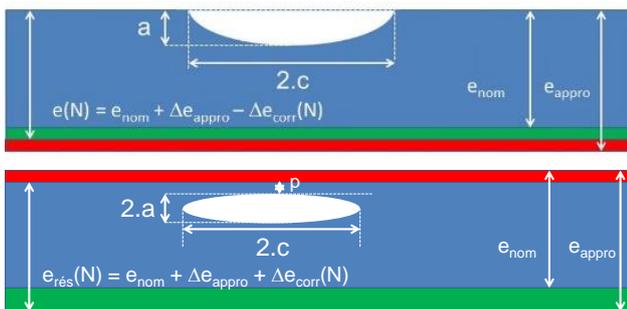


Fig. 2. Épaisseur résiduelle et défaut surfacique (en haut) ou interne (en bas)

2) Variables aléatoires

Dans ce second modèle, a minima deux nouvelles variables aléatoires doivent être ajoutées aux quatre variables aléatoires du premier modèle : la hauteur du défaut (notée a) et la ténacité de l'acier (notée K_{IC}) : voir TABLE II. Par ailleurs, la longueur des défauts (notée $2.c_{\text{max}}$) a été prise comme un paramètre déterministe (valeur enveloppe).

TABLE II. VARIABLES ALEATOIRES ADDITIONNELLES POUR LE MODELE DE MECANIQUE DE LA RUPTURE

Variable	Description	Distribution
a	Hauteur du défaut plan	Uniforme $[0, a_{\text{max}}]$
K_{IC}	Ténacité de l'acier	Weibull

Nous avons considéré que la distribution de la hauteur d'un défaut résiduel dépendait de l'efficacité des CND mis en œuvre à la réception des tuyaux (après leur fabrication). Les niveaux suivants de performance CND peuvent être considérés pour les défauts surfaciques ([5], annexe T) :

- S_1 : Contrôle à performance élevée (cordon arasé et poli avec rugosité $< 3,2 \mu\text{m}$).
 $a_{\text{max}} = 1 \text{ mm}$, $2.c_{\text{max}} = 5 \text{ mm}$;
- S_2 : Contrôle Non Destructif à performance standard (cordon avec polissage local).
 $a_{\text{max}} = 2 \text{ mm}$, $2.c_{\text{max}} = 10 \text{ mm}$.
- S_3 : Contrôle Non Destructif de qualité médiocre (cordon brut de soudage)
 $a_{\text{max}} = 4 \text{ mm}$, $2.c_{\text{max}} = 20 \text{ mm}$.

De même, les niveaux suivants de performance CND peuvent être considérés pour les défauts volumiques ([5], annexe T) :

- V_1 : Contrôle à performance élevée (contrôle AUT TOFD).
 $2.a_{\text{max}} = 2 \text{ mm}$, $2.c_{\text{max}} = 10 \text{ mm}$;
- V_2 : Contrôle Non Destructif à performance standard (contrôle ultrasonore classique).
 $2.a_{\text{max}} = 3 \text{ mm}$, $2.c_{\text{max}} = 15 \text{ mm}$.
- V_3 : Contrôle Non Destructif de qualité médiocre (radiographie sur tôle d'épaisseur $\leq 25 \text{ mm}$)
 $2.a_{\text{max}} = 5 \text{ mm}$, $2.c_{\text{max}} = 20 \text{ mm}$.

En outre, l'effet des contraintes résiduelles de soudage a également dû être pris en compte dans ce second modèle. Pour cela, nous avons considéré plusieurs niveaux de contrainte résiduelle possibles, allant de 0% à 80% de la limite d'élasticité, suivant le processus de détensionnement mis en œuvre en post-soudage. Dans la suite, nous nous intéressons plus particulièrement à 3 niveaux de contraintes résiduelles de soudage :

- $\sigma_{\text{res}} \in [0,6 \cdot \sigma_y ; 0,8 \cdot \sigma_y]$ en l'absence de détensionnement post-soudage (conduite forcée déjà en service, les contraintes résiduelles ayant été partiellement relaxées mécaniquement) ;
- $\sigma_{\text{res}} \in [0,4 \cdot \sigma_y ; 0,6 \cdot \sigma_y]$ après un détensionnement mécanique résultant d'une épreuve hydraulique ;
- $\sigma_{\text{res}} \in [0,2 \cdot \sigma_y ; 0,4 \cdot \sigma_y]$ après un détensionnement thermique post-soudage (PWHT).

3) Critère de ruine

Lorsque les pertes d'épaisseur par corrosion concernent des joints soudés, nous appliquons le critère de défaillance complet de la norme BS-7910 [5], basé sur un diagramme d'admissibilité exprimé dans l'espace à 2 dimensions L_R, K_R . La stabilité d'un défaut plan est évaluée en comparant la position du point (L_R, K_R) décrivant l'état de contrainte local au voisinage du défaut par rapport à une courbe d'admissibilité $K_R = f(L_R)$, comme le montre la Fig. 3 ci-dessous. Il existe 2 expressions distinctes de l'équation de la courbe d'admissibilité, suivant que la courbe de traction du matériau comporte ou non un plateau de Lüders : voir [5] et [3].

Lorsqu'on ne connaît pas a priori la nature du matériau, il est aussi possible de prendre une courbe d'admissibilité qui est enveloppe de l'ensemble des aciers (avec ou sans plateau de Lüders), matérialisée en rouge sur la Fig. 3.

La fonction d'état limite s'exprime sous la forme suivante :

$$G(FM, X) = f(L_R) - K_R \quad (10)$$

Le domaine de défaillance correspond au domaine défini par l'inéquation : $G(FM, X) < 0$

D'un point de vue mécanique, L_R correspond à la contrainte primaire locale adimensionnée par rapport à la limite d'élasticité du matériau σ_y et K_R correspond au Facteur d'Intensité de Contrainte K_I adimensionné par rapport à la ténacité K_{IC} du matériau.

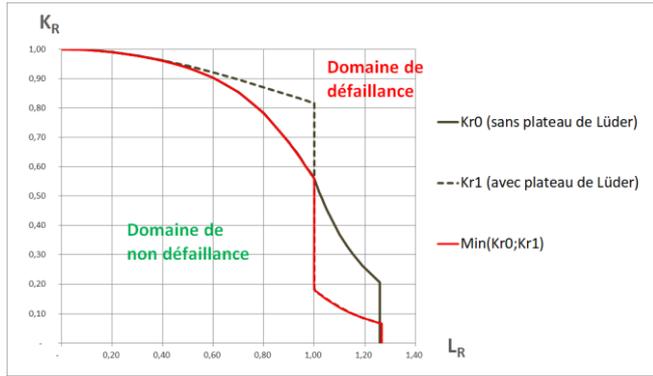


Fig. 3. Critère de défaillance représenté dans l'espace (L_R, K_R) [5]

Les coordonnées du point $(L_{R,N}, K_{R,N})$ décrivant l'état de contrainte du tuyau à l'année N sont définies par les équations (11) et (12) suivantes (cf. [3] pour les équations détaillées) :

$$L_{R,N} = \frac{M_1(a, 2c, e_N) \sigma_c(e_N)}{R_e} \quad (11)$$

$$K_{R,N} = \frac{M_2(a, 2c, e_N) (\sigma_{c,N} + \sigma_{rés}) \sqrt{\pi a}}{K_{IC}} \quad (12)$$

Avec les notations suivantes :

- $\sigma_{c,N}$: contrainte circonférentielle à l'année N : $\sigma_{c,N}(FM, X) = \frac{f \cdot (e_{nom} - \Delta e^*)}{FM \cdot e_N}$
- $\sigma_{rés}$ désigne la contrainte résiduelle de soudage,
- (a, c) : caractéristiques de hauteur et longueur du défaut (voir Fig. 2),
- e_N : épaisseur résiduelle à l'année N (voir Eq. (4.a) (4.b)),
- K_{IC} : ténacité du matériau,
- σ_y : limite d'élasticité du matériau,
- $M_1(a, c, e_N)$ et $M_2(a, c, e_N)$ sont des coefficients qui dépendent de la géométrie (a, c) du défaut (l'expression étant différente suivant que le défaut est interne ou débouchant) et de l'épaisseur résiduelle e_N de la tôle à l'année N . Ces coefficients sont exprimés analytiquement dans le modèle : voir [5] et [3].

D. Expression des probabilités de défaillance

1) Probabilité cumulée de défaillance

La probabilité de défaillance que nous cherchons à estimer est une probabilité annuelle. Pour ce faire, nous devons considérer l'évolution de la contrainte dans la tôle entre le début de l'année N et le début de l'année $N+1$, du fait de la perte d'épaisseur $\Delta e_{annuelle}$ due à la corrosion sur une année.

En considérant l'équation de la fonction d'état limite G explicitée dans la section précédente, la probabilité cumulée de défaillance à l'année N , notée $P_{cumulée}(N)$, s'exprime sous la forme suivante :

$$P_{cumulée}(N) = P(G_N(FM, X) < 0) \quad (13)$$

où $G_N(FM, X)$ désigne la valeur prise par la fonction d'état limite pour une réalisation du vecteur aléatoire X décrivant l'état du tuyau dont le Facteur de Marge vaut FM à l'année N .

2) Probabilité annuelle de défaillance

La probabilité annuelle de défaillance, notée $P_{annuelle}(N)$, correspond à la probabilité de défaillance avant le début de l'année $N+1$ sachant que le tuyau est non défaillant au moment de son diagnostic au début de l'année N . Il s'agit de la probabilité conditionnelle suivante :

$$P_{annuelle}(N) = P(G_{N+1}(FM, X) < 0 \mid G_N(FM, X) \geq 0) \quad (14)$$

Pour en faciliter le calcul, cette probabilité peut aussi s'écrire comme un rapport de probabilités ne faisant intervenir que des intersections d'événements :

$$P_{annuelle}(N) = \frac{P(G_{N+1}(FM, X) < 0 \cap G_N(FM, X) \geq 0)}{1 - P(G_N(FM, X) < 0)} \quad (15)$$

Lorsque la probabilité de défaillance à l'année N est faible (en pratique $< 10^{-2}$), il est possible d'effectuer une estimation approchée de cette probabilité annuelle (afin de réduire le temps de calcul) en considérant que le dénominateur de l'équation (15) est peu différent de 1. Cela revient à estimer un incrément annuel de probabilité, noté $P'_{annuelle}(N)$, dont l'expression est la suivante :

$$P'_{annuelle}(N) = P(G_N(FM, X) \geq 0 \cap G_{N+1}(FM, X) < 0) \quad (16)$$

Dans les équations (14), (15) et (16), $G_N(FM, X)$ désigne la valeur prise par la fonction d'état limite pour une réalisation du vecteur aléatoire X décrivant l'état de la conduite forcée au début de l'année N et $G_{N+1}(FM, X)$ désigne la valeur prise par cette fonction d'état limite au début de l'année $N+1$, avec le Facteur de Marge valant FM au début de l'année N .

Remarque : L'amincissement par corrosion étant une fonction strictement croissante, les trajectoires des fonctions d'état limite G sont strictement décroissantes, avec inclusion d'événements : $\{G_N(FM, X) < 0\} \subset \{G_{N+1}(FM, X) < 0\}$. L'incrément de probabilité peut donc s'exprimer sous la forme d'une différence de 2 probabilités, ce qui offre théoriquement une possibilité supplémentaire de le calculer en évitant le calcul d'une intersection d'événements :

$$P'_{annuelle}(N) = P(G_{N+1}(FM, X) < 0) - P(G_N(FM, X) < 0) \quad (17)$$

De plus, en considérant que l'amincissement annuel dû à la corrosion est petit devant l'épaisseur nominale de la tôle, et à condition que la probabilité de défaillance à l'année N reste faible ($< 10^{-2}$), on peut considérer que l'équation (18) donne une très bonne approximation de la probabilité annuelle de défaillance.

$$P_{annuelle}(N) \sim -\Delta e_{annuelle} \cdot \frac{\partial P(G_N(FM, X) < 0)}{\partial \Delta e_{corr}} \quad (18)$$

Ainsi, lorsque les probabilités sont faibles et que la perte annuelle d'épaisseur est petite devant l'épaisseur résiduelle, on peut s'attendre à obtenir une probabilité annuelle de défaillance quasiment proportionnelle à la cinétique de corrosion $\Delta e_{annuelle}$.

3) Probabilité conditionnelle de défaillance

Au moins jusqu'au début des années 1960, la pratique courante était de réaliser une épreuve hydraulique sur les tuyaux individuels en atelier. La pression d'épreuve était généralement comprise en 1,5 à 2 fois la pression maximale de service P_{service} . C'est pourquoi, il est également intéressant d'estimer la probabilité annuelle conditionnelle de défaillance pendant l'année N sachant qu'une épreuve hydraulique avait été réalisée avec succès à la mise en service de la conduite forcée. Cette nouvelle probabilité conditionnelle $P_{\text{annuelle-cond}}(N)$ en cas de réussite d'une épreuve hydrostatique s'écrit comme suit :

$$P_{\text{annuelle-cond}}(N) = \frac{P(G_{N+1}(FM, X) < 0 \cap G_N(FM, X) \geq 0 \cap G_{\text{épreuve}}(FM, X) \geq 0)}{P(G_{\text{épreuve}}(FM, X) \geq 0)} \quad (19)$$

Où $G_{\text{épreuve}}$ désigne la valeur de la fonction d'état limite au moment de l'épreuve hydraulique avec l'épaisseur initiale de fabrication de la conduite forcée $e_{\text{épreuve}}$ (au moment de l'épreuve hydraulique, les éventuels défauts de fabrication sont déjà présents, mais il n'y a pas encore de perte d'épaisseur par corrosion) :

$$e_{\text{épreuve}} = e_{\text{nom}} + \Delta e_{\text{appro}} \quad (20)$$

La fonction d'état limite $G_{\text{épreuve}}(FM, X)$ au moment de la réalisation de l'épreuve est évaluée en tenant compte de la contrainte circonférentielle vue lors de l'épreuve :

$$\sigma_C(\text{épreuve}) = \frac{k_{\text{épreuve}} \cdot f \cdot (e_{\text{nom}} - \Delta e^*)}{FM \cdot (e_{\text{nom}} + \Delta e_{\text{appro}})} \quad (21)$$

Où $k_{\text{épreuve}} = P_{\text{épreuve}} / P_{\text{service}}$ désigne le coefficient de pression d'épreuve et FM désigne le Facteur de Marge au début de l'année N .

Cette probabilité peut, à son tour, s'exprimer comme un rapport de deux probabilités ne faisant intervenir que des intersections ou unions d'événements :

$$P_{\text{annuelle-cond}}(N) = \frac{P(G_{N+1} < 0 \cap G_N \geq 0 \cap G_{\text{épreuve}} \geq 0)}{P(G_{\text{épreuve}} \geq 0 \cap G_N \geq 0)} \quad (22)$$

Ou encore :

$$P_{\text{annuelle-cond}}(N) = \frac{P(G_{N+1} < 0 \cap G_N \geq 0 \cap G_{\text{épreuve}} \geq 0)}{1 - P(G_{\text{épreuve}} < 0 \cup G_N < 0)} \quad (23)$$

4) Calcul des probabilités de défaillance

Dans l'espace des variables aléatoires, la probabilité de l'intersection d'événements intervenant dans les équations (15) et (16) est donnée par l'intégrale multidimensionnelle suivante (n désignant la dimension du vecteur X des variables aléatoires) :

$$P_{\text{annuelle}} = \int_{G_{N+1}(FM, X) \leq 0 \cap G_N(FM, X) > 0} f_X(X) dx_1 \dots dx_n \quad (24)$$

Le problème étant à marge décroissante, compte-tenu de la décroissance de l'épaisseur résiduelle sous l'action de la corrosion, la surface d'état limite G_N s'approche continûment de l'origine lorsque N croît, aussi bien dans l'espace physique X que dans l'espace standard U . La Fig. 4 illustre cette situation dans une vision simplifiée avec 2 variables. Le domaine d'intégration se présente sous la forme d'une bande d'autant plus étroite que la cinétique annuelle de perte d'épaisseur est faible.

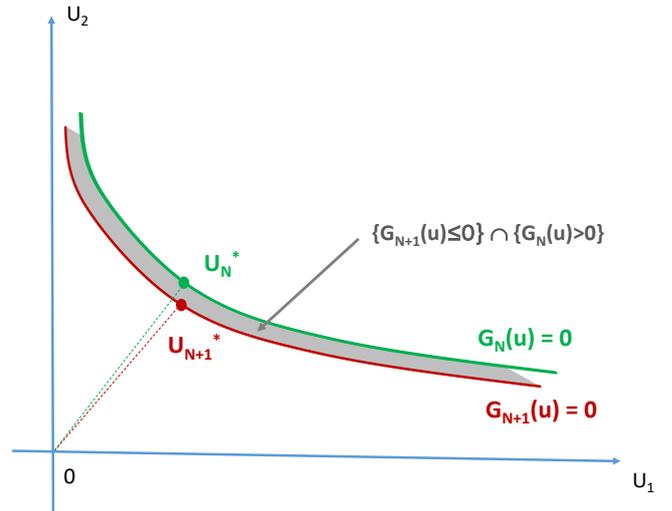


Fig. 4. Illustration du domaine d'intégration dans l'espace des variables aléatoires pour le calcul de la probabilité annuelle de défaillance

Dans le cas d'une probabilité conditionnelle avec épreuve hydraulique à la construction, la probabilité de l'intersection d'événements intervenant dans l'équation (19) est alors donnée par l'intégrale suivante :

$$P_{\text{annuelle}} = \int_{\substack{G_{N+1}(FM, X) \leq 0 \\ \cap G_N(FM, X) > 0 \\ \cap G_{\text{épreuve}}(FM, X) > 0}} f_X(X) dx_1 \dots dx_n \quad (25)$$

La Fig. 5 ci-après illustre le domaine d'intégration (en grisé) dans un cas simplifié en dimension 2 dans l'espace standard des variables centrées réduites. On constate que le design point U^* correspondant à cette triple intersection peut être très éloigné des 3 design points correspondant aux 3 surfaces d'état limite définissant le domaine.

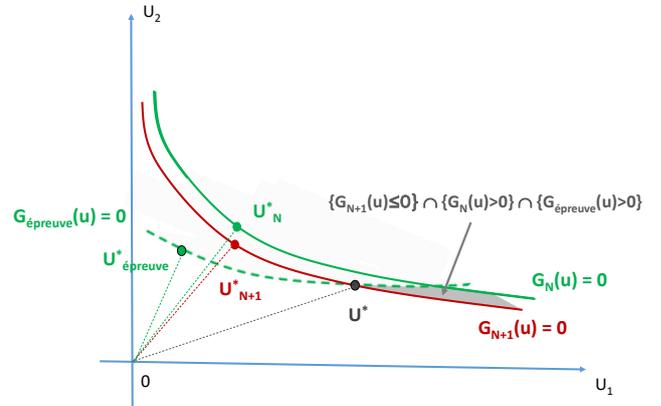


Fig. 5. Illustration du domaine d'intégration dans l'espace des variables aléatoires pour le calcul de la probabilité annuelle conditionnelle

III. LOGICIEL PERSALYS-PENSTOCK

A. La librairie OpenTURNS

OpenTURNS [8] est un outil de traitement des incertitudes développé depuis 2005 en partenariat par EDF-R&D, AIRBUS, PHIMECA Engineering, IMACS et plus récemment l'ONERA. Il est totalement adapté aux études de fiabilité des structures et couvre l'ensemble des étapes du référentiel évoqué d'analyse des incertitudes.

Cet outil regroupe :

- Une bibliothèque C++ avec des méthodes et algorithmes spécifiques au traitement des incertitudes ;
- Une interface textuelle en Python servant d'interface de programmation (module Python).
- Deux versions par an en moyenne sont diffusées par le partenariat, disponibles sous Windows et sous LINUX.

La librairie OpenTURNS permet de procéder à l'analyse de la dispersion centrale, de la probabilité de dépassement d'un seuil (en particulier la probabilité de défaillance), des quantiles et de la sensibilité. Dans le cas de modèles physiques complexes, il est possible de coupler OpenTURNS avec un code externe (par exemple code de calcul aux éléments finis).

Une large communauté d'acteurs a adopté la plate-forme OpenTURNS pour réaliser des études ou prototyper des travaux de recherche. Cette large diffusion permet l'enrichissement constant de la plate-forme par de nouvelles méthodes de plus en plus performantes et répondant à des besoins de plus en plus pointus.

B. Les algorithmes de résolution

L'ensemble des calculs a été implémenté en python utilisant la librairie OpenTURNS [8]. Compte tenu des probabilités cibles visées dans le cas des conduites forcées, la méthode de Monte-Carlo n'est pas appropriée. Une première possibilité consiste à appliquer la méthode FORM classique avec des tirages d'importance FORM-IS. Une autre possibilité a été d'abord mise en œuvre : il s'agit de la méthode FORM couplée avec des tirages d'importance autour des points de défaillance les plus probables de chacun des événements de l'intersection. Mais cette approche est en pratique souvent inefficace, les tirages étant souvent éloignés de l'intersection, notamment dans le cas de l'intersection des 3 domaines pour le calcul de la probabilité de défaillance annuelle conditionnelle avec prise en compte de l'épreuve hydraulique initiale : voir Fig. 5.

C'est pourquoi la méthode spécifique FORM-Multicontraintes-IS a été développée spécifiquement pour les conduites forcées.

Comme nous l'avons vu précédemment, le problème est à marge strictement décroissante : $\{G_N(u) \leq 0\} \subset \{G_{N+1}(u) \leq 0\}$. De plus, dans l'espace des variables physiques, comme dans l'espace standard, le domaine de défaillance a la forme d'une bande d'espace assez étroite (d'autant plus étroite que la perte d'épaisseur annuelle est faible). Dans le cas d'une épreuve hydraulique, cette bande est, de plus, délimitée par une troisième surface d'état-limite : voir Fig. 5.

Dans la plupart des cas, effectuer des tirages d'importance au voisinage des design-points U_i^* relatifs à chacun des domaines élémentaires (comme dans l'algorithme FORM-Système-IS) n'est pas une bonne stratégie car ces points U_i^* peuvent être assez éloignés du point U^* , les tirages d'importance se trouvant alors effectués au voisinage de ces points et non de U^* .

Dans ces configurations, il est préférable de rechercher directement le point $U^*_{Multicontraintes}$, qui minimise la distance $|u|$ en respectant les 3 contraintes $\{G_{N+1}(u) < 0\}, \{G_N(u) \geq 0\}$ et $\{G_{\text{épreuve}}(u) \geq 0\}$.

La méthode FORM-Multicontraintes-IS consiste donc à déterminer le point U^* autour duquel effectuer les tirages

d'importance dans le cas d'une probabilité annuelle (intersection de 2 domaines élémentaires) ou d'une probabilité annuelle conditionnelle (intersection des 3 domaines élémentaires), ce point U^* étant susceptible d'être assez éloigné des design points U_i^* relatifs à chaque domaine.

Pour cela, les algorithmes usuels FORM ont été adaptés pour rechercher un point unique pour une surface de défaillance multiple : c'est précisément le principe de l'algorithme FORM-Multicontraintes.

Les algorithmes habituels de recherche FORM peuvent donc être utilisés. Toutefois, on a constaté en pratique que les algorithmes Abdo-Rackwitz et Coby ne sont pas appropriés à ces configurations. Les algorithmes d'optimisation multi-contraintes suivants de la librairie Python NLOPT sont privilégiés : LD_AUGLAG (Augmented Lagrangian Algorithm), LD_MMA (Method of moving asymptotes), LD_SLSQP, and LN-COBYLA.

Finalement, pour tenir compte des situations dans lesquelles FORM-Système-IS fonctionne et celles pour lesquelles l'algorithme FORM-Multicontraintes-IS est préférable, un algorithme global testant successivement les 2 algorithmes de calcul a été implémenté.

Les algorithmes de recherche sont mis en œuvre dans un ordre prédéfini jusqu'à atteindre la convergence. Le test d'arrêt est basé sur l'atteinte d'un critère sur le coefficient de variation de $P_{\text{déf-annuelle}}$. Toutefois, si on atteint le nombre maximal de simulation choisi par l'utilisateur, l'algorithme suivant est testé automatiquement, et ainsi de suite. Si aucun algorithme ne permet d'atteindre l'objectif, le résultat permettant d'avoir le plus petit coefficient de variation est retenu. Cette sélection automatique d'algorithmes incluant des algorithmes FORM-Multicontraintes est également nommée la méthode FISTARR (FORM-IS-Test Automatique-Recherche Rapide) [11].

La méthode des SUBSETs a également été implémentée. Cette méthode permet de réduire considérablement le nombre des simulations de Monte-Carlo en procédant par étapes en déplaçant progressivement le seuil de l'état-limite s_i . On définit ainsi une suite d'ensembles imbriqués et à chaque étape, la probabilité $P(G(X) < s_i | G(X) < s_{i-1})$ est élevée et peut être estimée rapidement, au moyen de l'algorithme de Metropolis-Hastings de génération de chaînes de Markov

Enfin, d'autres algorithmes de calcul, tels le Line Sampling, ont été implémentés et sont en cours d'optimisation [11]. Le Line Sampling consiste à se positionner dans un hyperplan dans une direction orthogonale à la surface d'état limite, puis de générer les échantillons suivant plusieurs lignes de recherche dans cette direction.

C. L'application Persalys-Penstock

Récemment, l'interface graphique Persalys a été mise au point afin de permettre un pilotage de la librairie OpenTURNS visuel, approprié notamment aux non spécialistes. Cette nouvelle interface, qui peut ne donner accès qu'à une partie des fonctionnalités d'OpenTURNS, offre aussi la possibilité d'exécuter automatiquement des plans d'expériences de grande taille définis par l'utilisateur. C'est un outil flexible offrant une bonne base pour des développements spécifiques liés à différentes communautés métier.

L'application Persalys-Penstock, dédiée aux modèles de fiabilité des conduites forcées, a été développée depuis 2019 et utilise l'interface graphique générique Persalys.

Depuis janvier 2022, la version 1.6.1 de cette application permet la saisie des données et l'exécution des calculs de fiabilité sur des plans d'expérience déterministes ou aléatoires de grande dimension. Les figures ci-après montrent l'interface de saisie des données dans l'outil. Les données sont structurées en 5 onglets de la façon suivante :

- Le 1^{er} onglet (Fig. 6) **Critère de défaillance** concerne notamment le choix de la probabilité à calculer (cumulée, annuelle...), le Facteur de Marge, le coefficient d'épreuve hydraulique, les coefficients de sécurité définissant la contrainte admissible et le choix des multiplicateurs d'écart-type ou des quantiles pour définir les valeurs de calcul.
- Le 2^{ème} onglet (Fig. 7) **FM et chargement** permet de préciser pour quelle valeur du Facteur de Marge on souhaite évaluer la probabilité de défaillance, ainsi qu'un éventuel coefficient de surcharge $k_{PMIS}^{(*)}$ et un coefficient d'épreuve hydraulique initiale $k_{épreuve}$.
- Le 3^{ème} onglet (Fig. 8) **Géométrie** permet de renseigner l'épaisseur nominale et les distributions décrivant les dispersions de surépaisseurs d'approvisionnement et de sous-épaisseur de corrosion.
- Le 4^{ème} onglet (Fig. 9) **Matériau** permet de renseigner les caractéristiques de traction σ_y et σ_u de l'acier et leurs dispersions.
- Le 5^{ème} onglet (Fig. 10) **Mécanique de la rupture** permet de renseigner l'ensemble des données relatives à la performance des CND (déterminant la dimension des éventuels défauts résiduels dans les soudures), le mode de détensionnement des soudures et la distribution de ténacité de l'acier.
- Le 6^{ème} onglet (Fig. 11) **Méthode de calcul** est dédié au choix de la méthode de résolution numérique (Monte-Carlo, FORM, FROM-IS, SUBSET...) et au choix des paramètres correspondants (échantillonnage, critères de convergence...).

(*) : Le coefficient k_{PMIS} permet de simuler la possibilité d'une suppression accidentelle consécutive au dysfonctionnement d'un organe de coupure du débit.

Fig. 6. Persalys-Penstock : définition du critère de défaillance et des coefficients de sécurité

Fig. 7. Persalys-Penstock : Facteur de Marge et coefficient d'épreuve

Fig. 8. Persalys-Penstock : Facteur de Marge et coefficient d'épreuve

Fig. 9. Persalys-Penstock : définition des caractéristiques du matériau (instabilité plastique)

Fig. 10. Persalys-Penstock : définition lois et paramètre liés à la mécanique de la rupture dans les soudures (performances CND, contraintes résiduelles, ténacité)

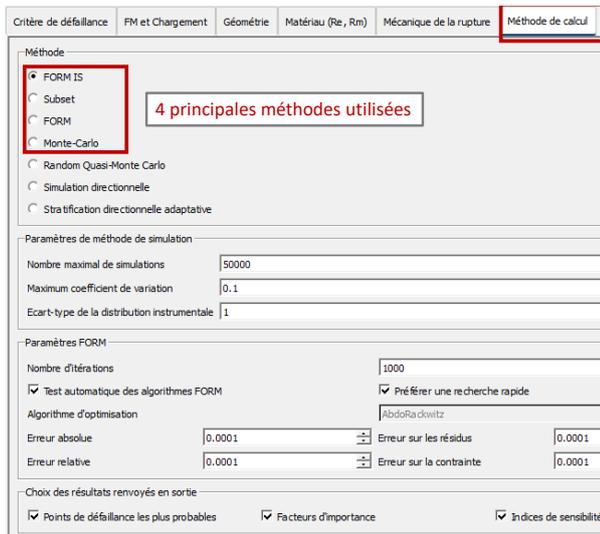


Fig. 11. Persalys-Penstock : choix de la méthode de calcul

Le logiciel permet de définir des plans d'expériences en faisant varier indépendamment tous les paramètres d'entrée du problème. Les plans d'expériences sont soit factoriels, soit aléatoires.

D. Probabilités de défaillance calculées

Nous avons vu précédemment l'expression générale des probabilités de défaillance annuelle. Dès lors que la probabilité des événements intervenant au dénominateur sont faibles, on peut approcher la probabilité de défaillance annuelle par un incrément annuel de probabilité, en ne calculant que le numérateur.

Le logiciel Persalys-Penstock offre la possibilité de calculer la probabilité annuelle ou son incrément annuel.

E. Validation du code et comparaison des algorithmes

Pour la validation du code, un plan d'expériences comprenant 864 configurations représentatives a été défini, combinant de larges intervalles de variation de chacun des paramètres. Sa mise en œuvre avec les différents algorithmes disponibles a montré que, dans la plupart des configurations, ce sont les algorithmes LD_AUGLAG et LD_MMA, suivis par Abdo_Rackwitz, se sont avérés être les plus performants.

F. Performances des différentes méthodes de calcul

Nous constatons en général une convergence assez rapide des calculs et une bonne concordance des résultats entre la méthode FORM-Multicontraintes-IS et la méthode des SUBSETs. La méthode FORM-Multicontraintes-IS présente l'avantage de permettre de piloter la simulation en imposant un niveau de précision souhaité sur la probabilité de défaillance via son coefficient de variation et conduit en général à des temps de calcul plus courts car de nombreuses configurations de conduites forcées donnent des probabilités de défaillance très faibles ($< 10^{-12}$), ce qui a pour effet de ralentir la méthode des SUBSETs.

La figure ci-après montre l'influence de la méthode de calcul et du nombre d'itérations sur l'estimation de la probabilité de défaillance conditionnelle. On remarque une bonne concordance des résultats dès 10 000 itérations entre les méthodes SUBSETs et FORM-Multicontraintes-IS, à l'exception du cas de l'épreuve hydraulique à 2 fois la pression de service, laquelle conduit à une probabilité de défaillance très faible.

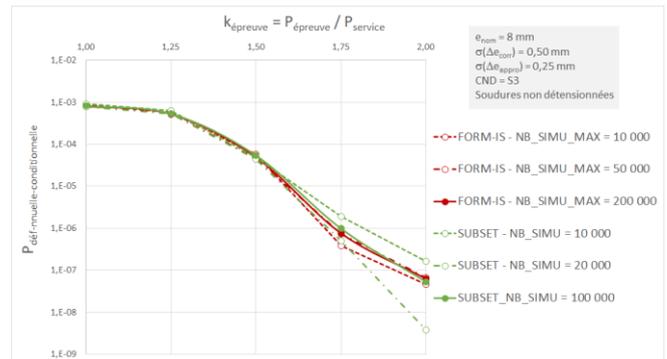


Fig. 12. Influence de l'algorithme et du nombre d'itérations sur l'évaluation de la probabilité annuelle conditionnelle

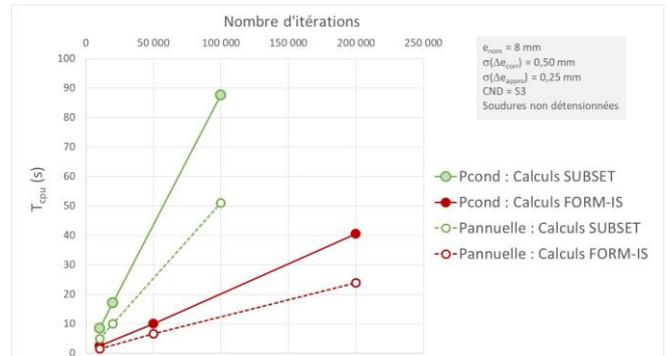


Fig. 13. Temps de calcul par configuration en fonction du nombre de simulations avec les algorithmes FORM-Multicontraintes-IS et SUBSETs

IV. FIABILITE HORS SOUDURES : ESTIMATION DE QUANTILES DE LA PROBABILITE ANNUELLE DE DEFAILLANCE

La publication Lambda-Mu 2020 [2] a présenté les résultats de calcul obtenus sur des plans d'expériences comportant 1944 configurations de conduites forcées. Les probabilités de défaillance ont été calculées pour des valeurs de calcul de l'épaisseur résiduelle et de la résistance à la rupture prises au quantile $Q_{2,5\%}$. Dans le cas de distributions normales, ce quantile conduit à légèrement surestimer les probabilités de défaillance par rapport à la pratique courante consistant à choisir les valeurs de calcul à $\gamma=2$ écart-types de la moyenne.

Avec cette hypothèse, sur l'ensemble des configurations calculées pour un Facteur de Marge $FM \geq 1$, la borne supérieure de la probabilité annuelle de défaillance est d'environ 3 décades inférieure au seuil admissible (10^{-7} à 10^{-6} par an), dès lors que le coefficient de variation α de l'épaisseur résiduelle est inférieur ou égal à 0,1 : voir Fig. 14 et Fig. 15.

Or l'expérience d'un grand nombre de diagnostics de conduites forcées montre que sur un tronçon homogène, on a toujours $\sigma(\Delta e) \leq 0,75$ mm. Par conséquent, pour des tuyaux d'épaisseur résiduelle moyenne supérieure ou égale à 8 mm, la condition $\alpha \leq 0,1$ est satisfaite.

La Fig. 14 rappelle ces résultats d'un plan d'expériences déterministe comportant 1944 configurations [2]. La courbe donne l'évolution de la borne supérieure de la probabilité annuelle de défaillance en fonction du coefficient de variation α de l'épaisseur résiduelle pour un Facteur de Marge $FM=1$ calculé à partir des quantiles $Q_{2,5\%}$ de l'épaisseur résiduelle et de la résistance à la rupture. Ainsi, pour $\alpha \leq 0,1$, on a : $P_{annuelle} \leq 2 \times 10^{-10}$.

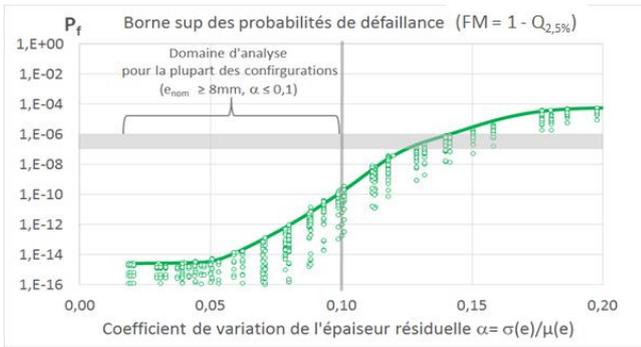


Fig. 14. Borne supérieure de la probabilité annuelle de défaillance (FM=1, $Q_{2,5\%}$) en fonction du coefficient de variation α [2] (plan d'expériences déterministe N=1944 configurations simulées)

Ces résultats ont pu être complétés par la mise en œuvre d'un plan d'expériences aléatoire de grande taille, cette nouvelle fonctionnalité ayant été implémentée dans Persalys-Penstock. L'objectif de ce calcul était d'obtenir des quantiles de la probabilité de défaillance annuelle enveloppe qui puisse s'appliquer à la plupart des configurations de conduites forcées rencontrées dans les diagnostics d'état. La TABLE III. montre les distributions des paramètres pris en compte pour la définition de ce plan d'expériences. La Fig. 15 montre les résultats obtenus suite à l'exécution d'un plan d'expériences aléatoire comportant 600 000 simulations de Monte-Carlo et permet de comparer la densité de ce plan d'expériences avec celle du plan d'expériences déterministes initial. Cette figure représente la distribution bivariée (α , P_f) obtenue lorsque le Facteur de Marge est fixé à 1 pour des valeurs de calculs prises au quantile $Q_{2,5\%}$.

TABLE III. PLAN D'EXPÉRIENCES ALÉAIRE

Variable	Loi
$\sigma(\Delta e_{appro})$ (mm)	Uniforme(0.25, 0.5)
$\mu(\Delta e_{corr})$ (mm)	Uniforme(0, 3)
$\sigma(\Delta e_{corr})$ (mm)	Uniforme(0.25, 0.75)
$\mu(R_m)$ (MPa)	Uniforme Discrète (320, 420, 500, 600, 750)
$cv(R_m)$ (%)	Uniforme(2, 10)
$\mu(\varepsilon)$ (MPa)	Uniforme(-50, 50)
$\omega(\varepsilon)$ (%)	Uniforme(2, 5)
$\Delta e_{annuelle}$ (mm)	Uniforme(-0.1, -0.02)
e_{nom} (cas 1) (mm)	Uniforme(5, 20)
e_{nom} (cas 2) (mm)	Uniforme(8, 20)

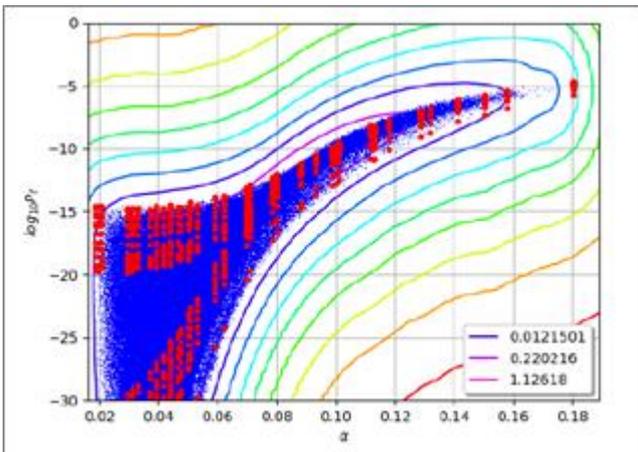


Fig. 15. Comparaison des plans d'expériences aléatoire N = 600 000 configurations simulées (bleu) et déterministe N = 1 944 simulations (rouge) pour $e_{nom} \geq 8$ mm et courbes de la densité de la loi bivariée (α , P_f)

En comparant les résultats issus des deux plans d'expériences, on constate que la borne supérieure déduite du plan d'expériences déterministe correspond à un quantile de la probabilité annuelle de défaillance compris entre 70% et 80%.

On en déduit (Fig. 16) une estimation des différents quantiles de la probabilité annuelle de défaillance en fonction du coefficient de variation α dans les mêmes conditions que la courbe précédente pour FM=1.

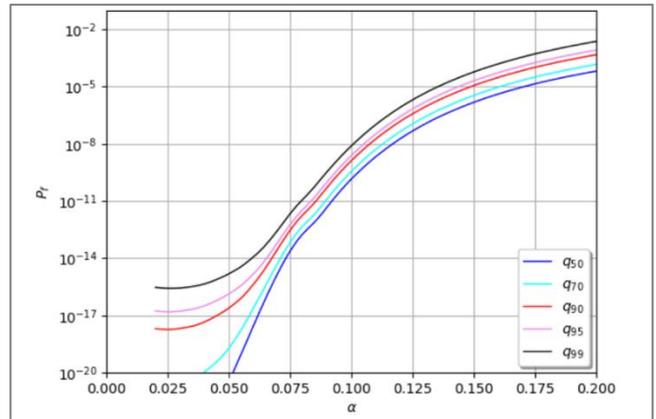


Fig. 16. Quantiles de la probabilité annuelle de défaillance (FM=1, $Q_{2,5\%}$) en fonction du coefficient de variation α (plan d'expériences aléatoire N= 600 000 configurations simulées)

En retenant $\alpha_{sup} = 0,1$ comme borne supérieure du coefficient de variation α de l'épaisseur résiduelle, on constate que le quantile $q_{99\%}$ de la probabilité annuelle de défaillance reste inférieur à 10^{-8} pour l'ensemble des configurations de conduites forcées.

Ce plan d'expériences a également été mis en œuvre pour estimer la probabilité annuelle de défaillance pour un Facteur de Marge compris entre 0,6 et 1. La Fig. 17 ci-dessous montre les courbes de différents quantiles de la probabilité annuelle de défaillance en fonction de FM pour $\alpha \leq \alpha_{sup} = 0,1$.

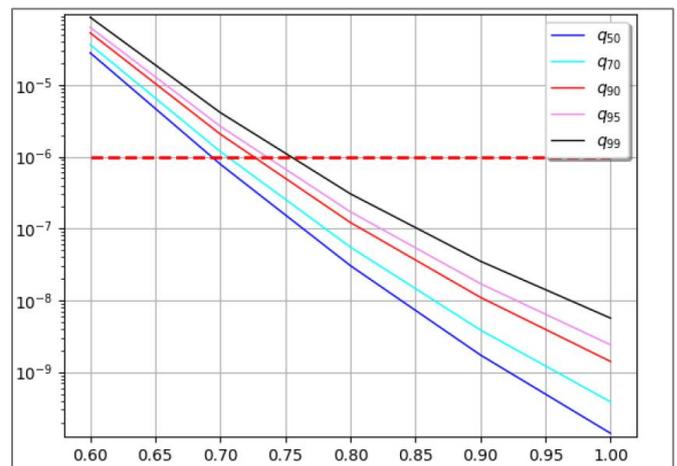


Fig. 17. Influence du Facteur de Marge sur les quantiles de la probabilité annuelle de défaillance ($\alpha \leq 0,1$) (plan d'expériences aléatoire)

Ainsi, pour $\alpha \leq 0,1$, si on considère les quantiles $q_{99\%}$ à $q_{90\%}$ de la probabilité annuelle de défaillance, on observe qu'une diminution du Facteur de Marge de 0,1 correspond à une augmentation de la probabilité annuelle de défaillance d'un facteur 10 environ.

V. FIABILITÉ DES JOINTS SOUDÉS : QUELQUES ÉTUDES DE SENSIBILITÉ

A. Influence de la perte d'épaisseur annuelle

Une étude de sensibilité a été menée pour évaluer l'influence de la perte d'épaisseur annuelle $\Delta e_{\text{annuelle}}$ sur la probabilité annuelle de défaillance. Pour une épaisseur nominale de 8 mm, on observe comme attendu (cf. §II.D.2) un comportement quasi linéaire de la probabilité de défaillance vis-à-vis de $\Delta e_{\text{annuelle}}$ sur l'intervalle [0,005 mm ; 0,5 mm].

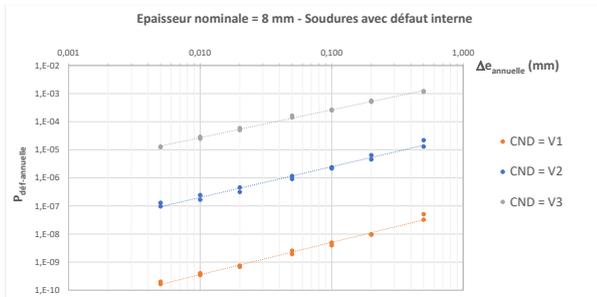


Fig. 18. Évolution de la probabilité annuelle de défaillance en fonction de la perte d'épaisseur annuelle par corrosion (cas d'une paroi d'épaisseur nominale 8 mm avec défaut interne)

La Fig. 19 montre l'impact de la perte d'épaisseur annuelle sur le nombre de simulations nécessaires pour l'estimation de la probabilité annuelle. On constate que pour un coefficient de variation objectif (ici $cv(P_{\text{annuelle}}) = 0,1$), le nombre d'itérations (donc le temps de calcul) est inversement proportionnel à $\Delta e_{\text{annuelle}}$. Cela tient au fait que la largeur du domaine de défaillance est proportionnelle à $\Delta e_{\text{annuelle}}$ (Fig. 4).

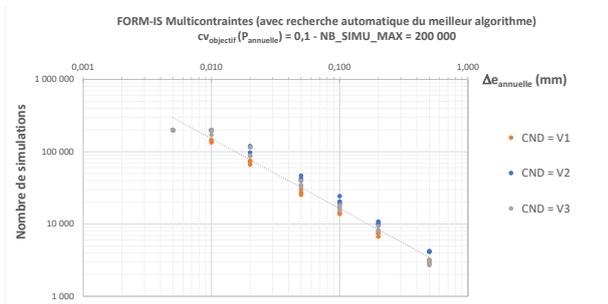


Fig. 19. Évolution du nombre de simulations nécessaires pour obtenir $cv(P) \leq 0,1$ en fonction de la perte d'épaisseur annuelle par corrosion

B. Influence des paramètres de fabrication

Les courbes ci-après montrent l'influence des paramètres de fabrication sur la probabilité annuelle de défaillance.

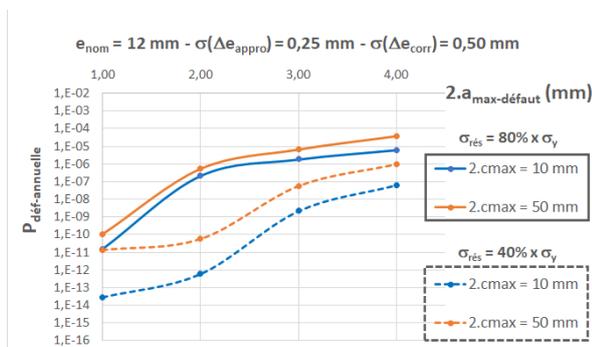


Fig. 20. Probabilité annuelle de défaillance en fonction de la hauteur $2 \cdot a_{\text{max}}$ des défauts internes (FM=1 – $e_{\text{nom}} = 12 \text{ mm}$ – défauts elliptiques à coeur du cordon)

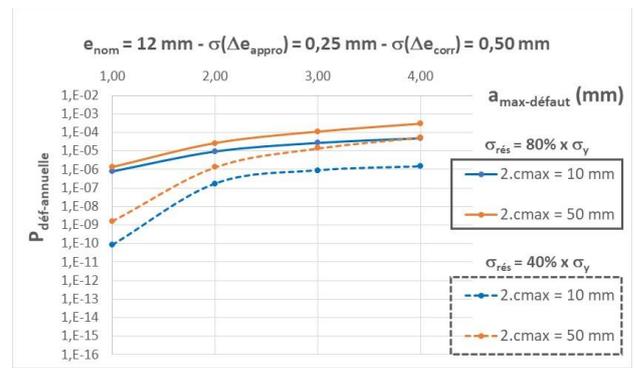


Fig. 21. Probabilité annuelle de défaillance en fonction de la hauteur a_{max} des défauts surfaciques (FM=1 – $e_{\text{nom}} = 12 \text{ mm}$ – défauts semi-elliptiques débouchants)

C. Influence du Facteur de Marge

Les courbes des Fig. 22 et Fig. 23 montrent, à titre d'exemple, l'évolution de la borne supérieure de la probabilité annuelle de défaillance en fonction du Facteur de Marge dans le cas de tôles d'épaisseur nominale 8 mm. Ces courbes permettent de visualiser l'influence de la performance du CND (S1 ou S2) et du mode de détensionnement des soudures.

Ces courbes ont été évaluées, en tenant compte de l'existence de défauts débouchants, pour une catégorie de tronçons répondant aux caractéristiques suivantes :

- $\mu(\sigma_u) = 480 \text{ MPa}$, $COV(\sigma_u) = 5\%$, $\omega = 2\%$, $\mu(K_{IC}) = 90 \text{ MPa}$, aucune information sur la courbe de traction (avec ou sans plateau de Lüders) ;
- $\sigma(\Delta e_{\text{appro}}) \leq 0,4 \text{ mm}$; $\sigma(\Delta e_{\text{corr}}) \leq 0,6 \text{ mm}$, $\mu(\Delta e_{\text{corr}}) \leq 1 \text{ mm}$.

Ces calculs montrent que, pour des tuyaux d'épaisseur nominale 8 mm, la diminution de la probabilité annuelle de défaillance est d'environ une décade (facteur 10) lorsqu'on améliore la qualité de CND en passant de S2 à S1. De même, le fait de détensionner les soudures peut faire gagner de une à deux décades (facteur 10 à 100) sur la probabilité annuelle de défaillance, toutes choses égales par ailleurs.

Dans le cas de tuyaux d'épaisseur nominale 12 mm, les gains de fiabilité résultant d'une amélioration de la performance des CND ou du détensionnement des soudures sont encore plus importants.

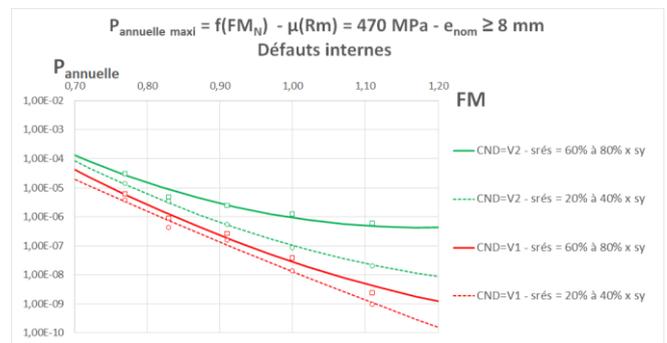


Fig. 22. Probabilité annuelle de défaillance enveloppe en fonction du Facteur de Marge – soudure avec défauts internes potentiels ($e_{\text{nom}} \geq 8 \text{ mm}$ – défauts elliptiques à coeur du cordon)

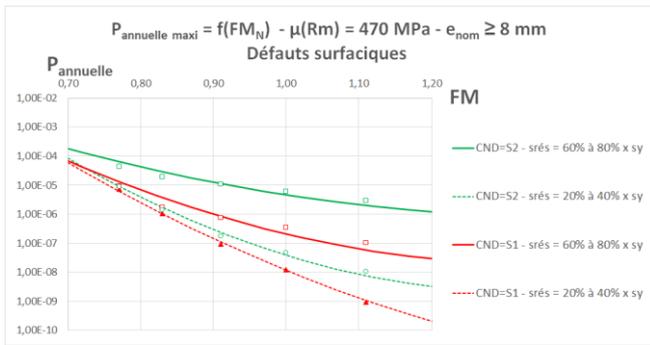


Fig. 23. Probabilité annuelle de défaillance enveloppe en fonction du Facteur de Marge – Soudure avec défauts surfaciques potentiels ($e_{nom} \geq 8$ mm – défauts elliptiques à coeur du cordon)

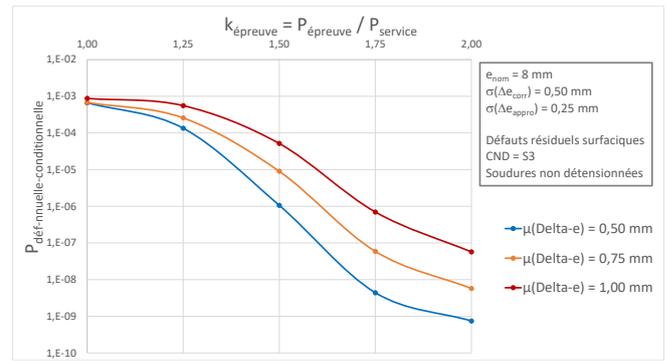


Fig. 25. Probabilité annuelle de défaillance enveloppe en fonction du Facteur de Marge – Soudure avec défauts surfaciques potentiels ($e_{nom} = 8$ mm – $0,25$ mm $\leq \mu(\Delta e_{corr}) \leq 1$ mm)

D. Influence de la pression d'épreuve

Les figures ci-après montrent l'influence d'une épreuve hydraulique initiale sur la probabilité de défaillance annuelle conditionnelle. La configuration présentée concerne une épaisseur nominale de 8 mm avec une perte d'épaisseur moyenne depuis la mise en service comprise entre 0,5 mm et 1 mm et un écart-type de la perte d'épaisseur par corrosion égale dans tous les cas à 0,5 mm. D'autre part, on considère le cas de soudures non détensionnées et contrôlées avec la performance de détection la plus médiocre (V3 pour le défaut interne et S3 pour le défaut surfacique). On observe les tendances suivantes :

- L'épreuve hydraulique a un effet beaucoup plus prononcé sur la diminution de la probabilité de défaillance annuelle dans le cas des défauts surfaciques, même dans le cas où la perte d'épaisseur moyenne depuis la mise en service vaut 1 mm. Par exemple, une épreuve hydraulique à 1,5 x la pression de service diminue de 3 décades la probabilité annuelle dans le cas de défauts surfaciques, contre 1 décade dans le cas de défauts internes avec 0,5 mm de perte d'épaisseur moyenne.
- Dans le cas de défauts internes à la paroi, l'effet de l'épreuve hydraulique sur la diminution de la probabilité annuelle de défaillance est considérablement réduit lorsque la perte d'épaisseur moyenne atteint 1 mm. Avec une telle perte d'épaisseur moyenne, cet effet reste significatif pour une pression d'épreuve élevée, de l'ordre de 2 x la pression de service.

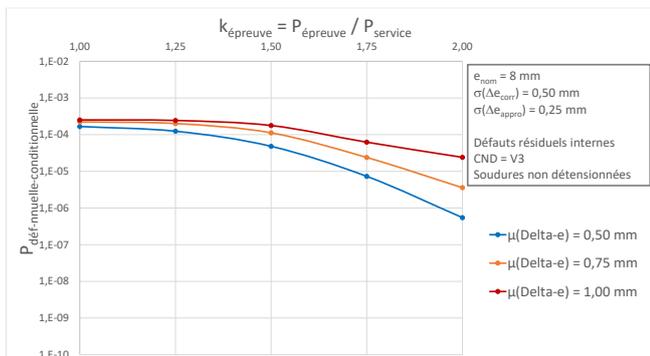


Fig. 24. Probabilité annuelle de défaillance en fonction de la pression d'épreuve – Soudure avec défauts internes potentiels ($e_{nom} = 8$ mm – $0,25$ mm $\leq \mu(\Delta e_{corr}) \leq 1$ mm)

VI. ÉLABORATION D'ABAQUES

Les calculs de plans d'expériences de grande taille (plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers de configurations) déterministes ou aléatoires conduisent à estimer des probabilités de défaillance enveloppes en fonction du Facteur de Marge. Il est possible de définir des catégories de conduites forcées en croisant les caractéristiques matériaux, d'estimer un quantile ou une borne supérieure de la probabilité annuelle de défaillance en fonction du Facteur de Marge : $P_{annuelle} = f(FM)$.

Les courbes des différentes figures montrent que cette fonction $f(FM)$, lorsqu'elle est représentée en échelle log, a un comportement très régulier. De nombreux tests ont montré qu'il était généralement possible d'approcher la fonction $\log_{10}(P_{annuelle})$ par une fonction polynômiale de degré 2 obtenue par régression suivant la méthode des moindres carrés (coefficient de corrélation linéaire dans la plupart des cas supérieur à 0,99).

À partir de cette approche, il devient alors possible de caractériser de façon suffisamment précise, l'évolution de la probabilité de défaillance d'un tuyau en fonction de son Facteur de Marge au moyen de seulement 3 coefficients {A, B, C} d'un trinôme de degré 2 sous la forme suivante :

$$P_{annuelle} = 10^{A \cdot FM^2 + B \cdot FM + C} \quad (26)$$

Une catégorie de conduite forcée peut être caractérisée en croisant les critères suivants :

- La plage d'épaisseur nominale ;
- La plage du coefficient de variation α de l'épaisseur résiduelle ;
- La zone concernée : pleine tôle ou soudure.

Dans le cas des soudures : leur mode de détensionnement, la performance des CND mis en œuvre, la réalisation ou non d'une épreuve hydraulique à la construction.

Le tableau ci-après indique quelques exemples de jeux de coefficients {A, B, C} estimés pour quelques configurations sans épreuve hydraulique.

TABLE IV. EXEMPLES DE COEFFICIENTS DE L'EXPRESSION ANALYTIQUE DE LA PROBABILITÉ ANNUELLE ENVELOPPE SUIVANT L'ÉQUATION (26) - $\Delta E_{\text{ANNUELLE}} = 0,1 \text{ MM/AN}$

Configuration	Plan d'expériences	A	B	C
Hors soudure				
$e_{\text{nom}} \geq 8 \text{ mm}$ $\alpha \leq 0,1$	Aléatoire $q_{90\%}(P_i)$	8,72	-25,38	7,81
$e_{\text{nom}} \geq 8 \text{ mm}$ $\alpha \leq 0,1$	Aléatoire $q_{95\%}(P_i)$	8,87	-25,23	7,74
Soudures non détensionnées				
$e_{\text{nom}} \geq 8 \text{ mm}$ $\alpha \leq 0,1 \text{ CND=S1}$	Déterministe	8,25	-22,43	7,50
$e_{\text{nom}} \geq 8 \text{ mm}$ $\alpha \leq 0,1 \text{ CND=S2}$	Déterministe	4,77	-13,41	3,30
Soudures détensionnées				
$e_{\text{nom}} \geq 12 \text{ mm}$ $\alpha \leq 0,1 \text{ CND=S1}$	Déterministe	6,93	-24,07	9,21
$e_{\text{nom}} \geq 12 \text{ mm}$ $\alpha \leq 0,1 \text{ CND=S2}$	Déterministe	11,21	-30,14	11,52

VII. CONCLUSIONS

Deux modèles de mécanique probabiliste ont été développés pour l'estimation de la probabilité annuelle de défaillance des tuyaux de conduites forcées soumises à un amincissement progressif par corrosion. Ces modèles ont été implémentés sous forme de routines Python dans l'environnement OpenTURNS. Le 1^{er} modèle, basé sur un critère de ruine par instabilité plastique, est adapté à la tôle hors soudures, tandis que le 2nd modèle, basé sur un critère de stabilité de défauts plans, permet d'estimer la probabilité de défaillance des joints soudés.

Ces modèles ont été implémentés dans l'outil Persalys-Penstock, dédiée à la fiabilité des conduites forcées. Cet outil permet la saisie des données d'entrée et rend possible l'exécution de plans d'expérience de grande taille, déterministes ou aléatoires. Plusieurs algorithmes de calcul de la probabilité de défaillance ont été implémentés, notamment la méthode FORM-Multicontraintes-IS (ou FISTARR), la méthode des SUBSETs et la simulation directionnelle. À l'usage, on constate que la méthode FORM-Multicontraintes-IS est particulièrement adaptée à la recherche d'un design-point situé à l'intersection de trois domaines dans l'espace des variables aléatoires, ce qui est spécifique au calcul de la probabilité annuelle de défaillance conditionnelle à la réussite d'une épreuve hydraulique. Les résultats obtenus avec les méthodes FORM-IS et SUBSETs sont très similaires, la méthode FORM-Multicontraintes-IS permettant généralement une convergence plus rapide.

Un plan d'expériences aléatoire comportant plus de 600 000 simulations a permis de parcourir l'espace des configurations usuelles de conduites forcées. Cette étude a permis d'évaluer des quantiles de la probabilité annuelle de défaillance en fonction du Facteur de Marge dans le cas de pertes d'épaisseur par corrosion affectant la tôle hors soudure. Cette étude a confirmé les résultats préliminaires qui avaient été donnés dans une étude précédente basés sur des plans d'expérience déterministes beaucoup plus modestes [2]. Ainsi, le Facteur de Marge (FM) et le coefficient de variation de l'épaisseur résiduelle (α) constituent les deux paramètres explicatifs majeurs de la borne supérieure de la probabilité annuelle de défaillance. Cette étude confirme également que pour des amincissements situés en pleine tôle (exempte de défauts plans), la prise en compte de valeurs de calcul au quantile $Q_{2,5\%}$ est très conservative et conduit à des probabilités de ruine plastique très inférieures aux seuils proposés dans les normes [5][6] lorsque la cinétique de corrosion inférieure ou égale à $100 \mu\text{m/AN}$ et $FM \geq 1$.

Par ailleurs, le modèle de calcul en mécanique de la rupture a été mis en œuvre sur quelques plans d'expériences déterministes. Ces calculs ont permis de quantifier l'augmentation relative de la probabilité de défaillance résultant de la présence potentielle de défauts plans dans les soudures. Les calculs ont clairement mis en évidence que les deux facteurs majeurs expliquant cette augmentation de risque sont le niveau de contraintes résiduelles et la performance des CND.

Dans les soudures comme en pleine tôle, on a pu vérifier que la probabilité annuelle de défaillance est quasiment proportionnelle à la perte annuelle d'épaisseur par corrosion sur un intervalle compris entre 5 et $500 \mu\text{m/AN}$.

Sur la base de plans d'expériences déterministes, des calculs effectués à $FM=1$ montrent également que, pour les différents sous-ensembles de conduites forcées considérés, la borne supérieure de la probabilité annuelle de défaillance reste inférieure au seuil admissible en présence de défauts de fabrication à condition que des CND suffisamment performants aient été mis en œuvre à la réception des tuyaux et que les contraintes résiduelles aient été suffisamment détensionnées (mécaniquement ou thermiquement).

Dans ces configurations avec défauts potentiels dans les soudures, les simulations ont également montré qu'une épreuve hydraulique initiale réalisée avec succès permettait de justifier une réduction très importante de la probabilité annuelle de défaillance, dès lors que la perte d'épaisseur moyenne depuis la mise en service reste modérée.

La probabilité annuelle de défaillance enveloppe en fonction du Facteur de Marge peut être approchée par une formulation analytique simple basée sur un polynôme de degré 2. Cette formulation rend possible l'élaboration d'abaques génériques de probabilité annuelle enveloppe calibrées pour des catégories de conduites forcées.

REFERENCES

- [1] Ardillon, E., P. Bryla, A. Dumas, "Optimisation probabiliste des marges vis-à-vis du risque d'instabilité plastique dans les diagnostics de tenue mécanique des conduites forcées", Congrès Lambda-Mu, France, 2018.
- [2] P. Bryla, E. Ardillon, A. Dumas, "Méthodes probabilistes appliquées à l'évaluation de l'intégrité des conduites forcées", Congrès Lambda-Mu, France, 2020.
- [3] A. Dumas, Note technique PHIMECA, "Fiabilité des conduites forcées - Documentation du modèle Persalys Penstock v9.0.3-pen1.6.1", 2022.
- [4] M. Lemaire, "Structural Reliability", Wiley – ISTE, 2009.
- [5] BS 7910 (2019), "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures", British Standard Institute, 2019.
- [6] ISO 2394 (2015), "General principles on reliability for structures", International Standard, 2015.
- [7] CODETI Div3 "Code de construction des conduites forcées", SNCT Publications, 2018.
- [8] OpenTURNS (2018). Reference Guide. Tech rep EDF-EADS-PHIMECA, www.openturns.org.
- [9] E. Ardillon & al., "Méthode FORM", Fiche Méthode de l'IMdR, Groupe de Travail Sécurité et Sureté des Structures de l'IMdR. https://www.imdr.eu/shop_818-47328-5300-835/fiche-methode-methode-de-fiabilite-du-premier-ordre.html, 2015.
- [10] M. Lemaire, E. Ardillon, "Analyses de Fiabilité des Structures," Article publié dans la Bibliothèque Virtuelle de l'AFNOR, 2018.
- [11] E. Ardillon, A. Ajenjo P. Bryla, A. Dumas, "System events in Structural Reliability : improvement of algorithms for some reliability assessment methods", 11èmes Journées Fiabilité des Matériaux et des Structures – Clermont-Ferrand, France, 2022.