Approche Probabiliste au Contrôle et Suivi des Joints de Soudure des Conduites

N. ABDELBAKI, E. BOUALI, R. BOUZID, M. GACEB

Laboratoire de Fiabilité des Equipements Pétroliers et Matériaux
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Université de Boumerdès – Algérie –
doyenfhc@umbb.dz

Résumé :
Les conduites de transport des hydrocarbures sont des constructions mécano-soudées, confrontées en exploitation à des conditions particulières de fonctionnement. Les ruptures des joints de soudure des conduites, bien que rares, ont des conséquences majeures aux niveaux humain, environnemental et économique. Ces derniers sont le siège de formation des fissures de fatigue. L'utilisation des résultats d'inspection in situ, à partir des techniques de contrôle non destructif, est une composante essentielle de la réévaluation et du maintien de l'intégrité des conduites dans leur fonction. Elle nécessite des méthodes de calcul et des outils d'aide à la décision en appui des campagnes d'inspection et de réparation. C'est dans ce contexte que la présente étude a été réalisée qui est une contribution à l'effort méthodologique d'évaluation de l'endommagement par détection de fissure et d'estimation de la durée de vie résiduelle des joints de soudure sous sollicitations en fatigue.

Abstract:
The pipelines used for hydrocarbons transportation are mecano-welded constructions, confronted in service to particular working conditions. The rupture of pipeline welded joints, even though rare, have major consequences at the human, environmental and economical levels. The welded joints are potential site for the formation of fatigue cracks. The use of results from in situ inspection, starting from non destructive testing techniques is an essential component of the reevaluation and maintaining of the pipelines working integrity. It requires computing methods and decision helping tools in support of inspection and repairing campaigns. It is in this context that the present study has been achieved which constitutes a contribution to the methodological effort for the evaluation of damage by crack detection and for the prediction of the residual life of welded joints under fatigue loading.

1 Introduction

Pour faire face à une consommation de plus en plus grande, le monde a été amené à acheminer, stocker et raffiner plus de pétrole, de gaz et de produits finis. Pour des raisons économiques, afin de transporter les produits finis, on utilise le pompage successif. Le pompage successif « le batching » consiste à expédier les produits séparément dans un ordre déterminé par une même conduite. Ces produits sont, soient de différents carburants, soit du pétrole brut et du condensât. L'un des problèmes relatifs au pompage successif est l'instabilité des paramètres de fonctionnement des stations de pompage telle que la pression de refoulement, qui dépend du nombre de cycles de pompage successif, des séquences de cargaisons et des propriétés des produits transportés: Genot, V. (1980). Les variations de la pression dans les conduites se manifestent aussi lors de la mise en marche et l'arrêt des pompes ou des stations de pompage. Ainsi l'écoulement du fluide dans la conduite passe périodiquement du régime permanent avec une pression constante à un régime non permanent qui donne naissance à des chargements dynamiques. La pratique d'exploitation des conduites, confirme le fait que les charges cycliques provoquées par les régimes d'écoulement non permanent conduisent à la formation de fissures de fatigue dans les joints de soudure et qui s'achèvent par une rupture brutale. Bien que rares, les ruptures des conduites ont des conséquences désastreuses, touchant la vie humaine, les biens et l'environnement. Il est donc utile de développer des éléments d'aide à la décision s'appuyant sur un suivi du comportement des joints de soudure des conduites. Le présent article présente une approche probabiliste de certains problèmes liés au contrôle non destructif des joints de soudure des conduites vis-à-vis des risques de fatigue. Le phénomène de fatigue est un processus lent qui introduit de nombreuses incertitudes et nécessite des inspections afin de prévenir le risque de rupture. Le mode probabiliste doit donc incorporer les résultats d'inspection avec leur qualité afin de mieux évaluer l'endommagement. D'autre part, l'utilisation de l'approche dite de la mécanique de la rupture permet de relier la dimension de la fissure et les propriétés des matériaux d'une part et le chargement du joint de soudure sollicité d'autre part. Enfin notons que dans certains domaines de l'industrie des hydrocarbures on assiste déjà, depuis une dizaine d'années, à la rationalisation des décisions de maintenance des constructions mécano-soudées: Goyet (1996), Medsen *et al* (1989) et que l'augmentation considérable du prix du pétrole est un argument convainquant pour revoir de nouveau les problèmes liés à la sûreté de fonctionnement et la maintenance des conduites de transport des hydrocarbures.

2 Fiabilité d'un joint des soudures vis-à-vis du degré de défectuosité

Les résultats des inspections in situ servent, entre autres, au contrôle et à la prévision de la fiabilité des conduites en exploitation. Il devient alors nécessaire de définir préalablement la fiabilité des joints de soudures contrôlés, en tenant compte des diverses défectuosités qui peuvent y exister ou se manifester et des charges qui les sollicitent. On décrit l'état d'un joint de soudure, sollicité à l'action d'un vecteur chargement $\vec{s}$ à un instant donné par une équation de la forme :

$$\vec{u} = H\left[\vec{s}\right] \tag{1}$$

Où $\vec{s}$: Charges extérieures sollicitant les tubes : pression intérieure, poids des tubes, actions du milieu ambiant.

$\vec{u}$: Effort intérieur dans le joint de soudure.

Les vecteurs d'état $\vec{u}$ et de chargement $\vec{s}$ sont des éléments des espaces U et S correspondant à chaque réalisation du processus $\vec{u}(t)$qui lui correspond à une trajectoire dans l'espace U. L'opérateur H définit le schéma et la méthode de calcul envisagés. Les conditions d'utilisation et les exigences sécuritaires relatives au joint de soudure forment le vecteur qualité $\vec{q}$, élément de l'espace qualité Q. le vecteur qualité $\vec{q}$ et lié au vecteur chargement $\vec{u}$ par un certain opérateur M :

$$\vec{q} = M\left[\vec{u}\right] \tag{2}$$

L'ensemble des valeurs admissibles du vecteur $\vec{q}$ forment dans l'espace qualité le domaine D dont la frontière F n'appartient pas au domaine des valeurs admissibles du vecteur qualité $\vec{q}$. La frontière F correspond à une surface $\sum$ dans l'espace Q dite surface limite. Les différents joints de cette surface correspondent à différents états physiques du joint de soudure. Si à l'instant $t = t_0$ le vecteur qualité $\vec{q}$ se trouve à l'intérieur du domaine D, alors la première intersection du processus $\vec{q}(t)$ et de la surface $\sum$ à l'extérieur du domaine D correspond à une défaillance du joint de soudure. Dans ce cas la fiabilité du joint de soudure est estimée par la probabilité de séjour du vecteur qualité $\vec{q}$ dans le domaine des valeurs admissibles D, durant l'intervalle $[t_0,\ t]$:

$$P(t) = \vec{P}\left\{\vec{q}(\tau) \in D;\ \tau \in [t_0,\ t]\right\} \tag{3}$$

Pour évaluer l'état courant d'un joint de soudure et faire une prévision de son état futur, un nombre déterminé de paramètres d'état est défini par les résultats de contrôles non destructifs. Si d'après les résultats de la dernière inspection réalisée au moment t_c, on a $\vec{q}(t_c) \in D(t_c)$, alors la fiabilité prévisionnelle du joint de soudure pour le prochain intervalle $[t_c,\ t]$ est donnée par l'expression :

$$P\left(t\,|_{T_k}\right) = \vec{P}\left\{\vec{q}\left(\tau\,|_{T_k}\right) \in D(T_k);\ \tau \in [t_k, t]\right\} \tag{4}$$

Où T_k : volume d'informations sur les différents l'état du joint de soudure cumulés durant l'intervalle $[t_0,\ t_c]$.

On note que les opérations de remise en état d'un joint de soudure défectueux sont interprétées, comme le retour préventif du vecteur qualité dans le domaine D.

3 Formulation d'une stratégie d'inspection

On considère qu'une compagne d'inspection d'une conduite doit être programmée si la probabilité de bon fonctionnement de la conduite sous condition qu'un échantillon témoin de joints de soudure a été contrôlé, est au dessous d'un niveau limite fixé. Le volume de l'échantillon témoin « n » est déterminé d'après des critères statistiques: Dacunha *et al* (1994); et sa répartition sur la conduite est déterminée par les conditions de travail et la facilité d'accès aux joints de soudure. La stratégie de contrôle des joints de soudure témoins considérés consiste à déterminer l'ensemble $\{t_1,\ t_2, \ldots,\ t_n\}$des moments de contrôle, tel qu'après chaque contrôle la probabilité de bon fonctionnement de l'échantillon est maximale. Soit P_c la probabilité de bon fonctionnement de l'échantillon témoin sous condition, que les joints $J_1,\ J_2, \ldots,\ J_j$ ont été contrôlés respectivement aux moments $T_1,\ T_2, \ldots,\ T_j$. L'efficacité de chaque contrôle réalisé est évaluée par le rapport des probabilités conventionnelles de bon fonctionnement avant et après contrôle :

$$P_c(T_j + \tau) \Big/ P_c(T_j) \qquad \text{où } \tau \text{ : pas de contrôle} \tag{5}$$

La stratégie recherchée est celle qui assure une efficacité globale maximale du contrôle de l'échantillon témoin, autrement dit il faut déterminer une suite de moments de contrôle des joints de soudure témoins, qui maximalise le rapport :

$$\frac{1}{\tau}\sum_{j=1}^{n}\left[\ln P_c(T_j - \tau) - \ln P_c(T_j)\right] \rightarrow \max \tag{6}$$

Ce problème est résoluble en utilisant les méthodes de la programmation linéaire.

4 Qualité des résultats d'inspections

La qualité des résultats d'inspections dépend de l'aptitude de la technique de détection des fissures utilisée, dans des conditions opératoires données. Une approche probabiliste au problème considéré consiste à estimer en premier lieu l'un des indicateurs suivants : La probabilité conditionnelle $P(D|a)$ de détection de fissure de taille donnée « a », localisée préalablement à un endroit de mesure ou la probabilité $P_D(a)$ de détection d'une fissure de taille supérieure ou égale à une valeur donnée « a ». La probabilité $P(D|a)$ est évaluée à partir des résultats des tests de contrôle appliqués à une population de joints de soudure de longueur unitaire de référence :

$$\hat{P}(D|a) = \frac{\text{Nbre de succès}}{\text{Nbre total d'essais}} = \frac{n_1}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} \tag{7}$$

- n_1 vraie fissures détectées ; n_2 fissures existantes de la classe considérée non détectées ; n_3 nombre de fausses détection; n_4 nombre d'absences de fissures sur le cordon de soudure.

La relation entre les probabilités $P_D(a)$ et $P(D|a)$ peut être déterminée en utilisant la formule de Bayes :

$$P_D(a) = \left[\int_a^{\infty} P(D|a) f(a) da\right] \left[1 - F(a)\right]^{-1} \tag{8}$$

Où $f(a) = F'(a)$: densité de distribution des probabilité des tailles des fissures

Pour une classe de fissures détectables par la technique considérée avec une grande certitude, les valeurs des deux indicateurs $P_D(a)$ et $P(D|a)$ sont très proches. Dans ce cas, en général la différence entre les valeurs de $P_D(a)$ et $P(D|a)$ dépend du type de la fonction $f(a)$.

Pour évaluer la qualité des résultats d'inspections, on recherche aussi les indicateurs donnés par la proportion des bonnes détections et les proportions de fissures manquées. On peut montrer que l'espérance mathématique $\xi(a)$ du nombre de fissures manquées par les tests de contrôle des fissures de taille « a » et l'espérance mathématique $\mu(a)$ du volume total de fissures dont la taille dépasse la valeur « a » sont liées par l'équation :

$$\xi(a) = \mu(a)\left[1 - P_D(a)\right] \tag{9}$$

De l'expression (4), on déduit que l'évaluation statistique de l'indicateur $P_D(a)$ est donnée par la formule :

$$\hat{P}_D(a) = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \tag{10}$$

La probabilité de manquer dans les tests de contrôle k fissures de taille dépassant la valeur « a »est donnée par la loi de Poisson: Dacunha (1994)

$$Q_k(a) = \frac{\xi^k(a)}{k!} \exp\left[-\xi(a)\right], \quad k = 1, 2, \ldots \tag{11}$$

De l'expression (11) on déduit que la fonction risque définie comme la probabilité de manquer une fissure de taille dépassant la valeur « a » est égale à :

$$H(a) = 1 - \exp\left(-\xi(a)\right) \tag{12}$$

Ainsi l'estimation statistique du risque est donnée par la formule :

$$\hat{H}(a) = 1 - \exp\left(-n_2\right) \tag{13}$$

5 Prévision de croissance des fissures de fatigue dans un joint de soudure

En service les joints de soudure des conduites de transport des hydrocarbures sont soumis à des chargements d'amplitudes variables complexes. Les spectres de chargement sont caractérisés par les maxima et minima de charge, les séquences de chargement, la fréquence du cycle et l'environnement. La croissance des fissures de fatigue sous chargement d'amplitude variable peut être étudié en sommant les accroissements de longueur des fissures Δa_i dans chaque cycle de chargement: Guerney (1978).

$$a_N = a_0 + \sum_{i=1}^{N} \Delta a_i \tag{14}$$

Où a_0 - longueur initiale de la fissure, a_N - longueur de la fissure après N cycles

Δa_i - accroissement de la longueur de la fissure provoqué par le cycle i.

Pour estimer la croissance des fissures de fatigue en service, il est nécessaire de décomposer un cycle de chargement complexe en cycles élémentaires de chargement ou en bloc pour lequel on connaît déjà les caractéristiques sous amplitude constante. Chaque cycle élémentaire est un segment de réalisation entre deux inspections voisines du niveau moyen des contraintes qui contient un maximum σ_{max} et un minimum σ_{min}. En négligeant l'influence de la fréquence de chargement, l'accroissement de la longueur de la fissure Δa_i par cycle dépend seulement de a, σ_{max} et σ_{min}. En mécanique de rupture le nombre de paramètres déterminants se réduit aux valeurs K_{max} et K_{min} du facteur d'intensité de contrainte par cycle de chargement.
Dans la propagation stable de la fissure, la loi de propagation peut être formulée par la relation de Paris-Erdogon: Bardal (1995)

$$\frac{da}{dN} = C\left(\Delta K\right)^m \tag{15}$$

Où $\Delta K = K_{max} - K_{min}$, C, m – constantes du matériau dans lequel se propage la fissure.
Pour prédire la croissance de la fissure, on utilise la méthode d'accumulation linéaire des dommages. Ainsi, pour un groupe de cycles composé de N_1 cycles de chargements identiques correspondant à un régime d'écoulement permanent déterminé du produit dans la conduite et de N_2 cycles de chargements identiques correspondant à un régime d'écoulement non permanent déterminé, on a:

$$\frac{da}{dN} = N_1 \nu_1\left(a\right) + \varphi \nu_2\left(a\right) \tag{16}$$

Où $\nu_1\left(a\right)$ et $\nu_2\left(a\right)$- taux de croissement de la taille de fissure respectivement en régime d'écoulement permanent et non stationnaire.

φ - facteur de l'effet de retard tenant compte des pics de pression intérieure dus aux arrêts brusques des pompes suite à des avaries.
Le nombre de cycles N_f, pour lequel la fissure atteint la longueur finale est obtenu à partir de l'expression (17) en tenant compte de l'expression (16):

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{N_1 \nu_1\left(a\right) + \varphi N_2 \nu_2\left(a\right)} \tag{17}$$

Où a_f - longueur finale de la fissure, a_i - longueur de la fissure au moment de la prédiction

Si on considère, par exemple, la propagation d'une fissure résultant d'un défaut de surface de type semi-elliptique dans un joint de soudure d'une conduite, alors en régime d'écoulement permnent du produit, le chargement du joint de soudure considéré est caractérisé par des fluctuations de la pression intérieure donnant naissance à une variation $\Delta\sigma$ de la contrainte principale:

$$\Delta\sigma = A\,\bar{\sigma} \quad , \text{ où } A \text{ – coefficient de variance, } \bar{\sigma} \text{ - contrainte principale moyenne}$$

Le régime transitoire d'écoulement du produit dans la conduite est caractérisé par des variations brusques de la pression intérieure. Dans ce cas la variation de la contrainte principale:

$$\Delta\sigma^* = \sigma^{max} - \bar{\sigma} \quad , \quad \text{où } \sigma^{max} \text{ - valeur maximale de la contrainte principale}$$

Les taux de croissement de la longueur de la fissure en régime stationnaire et transitoire sont égaux à : Bardal (1995)

$$\begin{aligned} \nu_1(a) &= C\left(\Delta\sigma\sqrt{\frac{1}{Q_1}}\right)^m \quad , \text{ si } \Delta\sigma \geq 0,5\,\sigma_{-1} \\ \nu_1(a) &= 0 \quad , \text{ si } \Delta\sigma < 0,5\,\sigma_{-1} \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} \nu_2(a) &= C\left(\Delta\sigma\sqrt{\frac{1}{Q_2}}\right)^m \quad , \text{ si } \Delta\sigma^* \geq 0,5\,\sigma_{-1} \\ \nu_2(a) &= 0 \quad , \text{ si } \Delta\sigma^* < 0,5\,\sigma_{-1} \end{aligned} \tag{19}$$

Avec: $Q_{1,2} = 1,416 - 0,212\dfrac{\sigma_{1,2}}{\bar{\sigma}_R}$, $\bar{\sigma}_R$ - limite de rupture, σ_{-1} - limite d'endurance

En substituant dans l'expression (16) les grandeurs $\nu_1(a)$ et $\nu_2(a)$ par leurs valeurs, on obtient le nombre de cycles de chargement N_f:

$$N_f = \frac{2}{(2-m)F(N)}\left[a_f^{\frac{2-m}{2}} - a_i^{\frac{2-m}{2}}\right] \quad , \quad m \neq 2 \tag{20}$$

$$N_f = \frac{1}{F(N)}\left[\ln a_f - \ln a_i\right] \quad , \quad m = 2 \tag{21}$$

Avec : $F(N) = c\,\pi^{m/2}\left[N_1\left(\dfrac{\Delta\sigma}{\sqrt{Q_1}}\right)^m + \varphi\,N_2\left(\dfrac{\Delta\sigma^*}{\sqrt{Q_2}}\right)^m\right]$

La longueur initiale maximale de fissure $a_i(N)$ qui ne se développe pas jusqu'à la longueur finale est déterminée à partir des expressions (20) et (21):

$$a_i(N) = \left[a_f^{\frac{2-m}{2}} - \frac{2-m}{2}F(N).N\right]^{\frac{2-m}{2}} \quad , \quad m \neq 2 \tag{22}$$

$$a_i(N) = \exp\left[a_f - F(N).N\right] \quad , \quad m = 2 \tag{23}$$

Pour déterminer la valeur de a_i, on utilise les résultats des inspections réalisées après N_0 cycles de chargement. Dans ce cas et ayant la longueur de la fissure a_N, à l'aide des expressions (20) et (21), on obtient:

$$a_i = \left[a_{N_0}^{\frac{2-m}{2}} - \frac{2-m}{2} F(N).N_0 \right] \quad , \quad m \neq 2 \tag{24}$$

$$a_i = \exp\left[\ln a_{N_0} - F(N).N_0 \right] \quad , \quad m = 2 \tag{25}$$

Ainsi ayant obtenu à l'aide des expressions (22) et (23) la valeur de $a_i(N)$, on détermine la probabilité de défaillance $Q(N)$ du joint de soudure après N cycles de chargement:

$$Q(N) = P\{a_i \leq a_N \leq a_f\} = F_{a_i}(a_f) - F_{a_i}(a_i(N)) \tag{26}$$

Où $F_{a_i}(X)$ - fonction de distribution des dimensions initiales

a_i est déterminée à partir des expressions (24) et (25).

6 Conclusion

Le contrôle non destructif est une composante importante du maintien de l'intégrité des conduites en service. L'introduction des méthodes probabilistes permet de cerner de plus prêt certains problèmes liés au contrôle non destructif et contribue grandement au progrès de la fiabilité des conduites de transport des hydrocarbures.

Références

Bardal , E.1995 Fatigue handbook (Ed. A. A. Naess), Tapir.
Dacunha, D., Duflo, M. 1994 Probabilité et statistiques (Ed. Masson)
Genot, V. 1980 Transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation (Tech).
Guerney, 1978 Fatigue of welded structures, Combridge University, Press. 2nd. Ed.
Goyet, J., Maroni, A. 1996 Optimal inspection and repair planning : An application with a sebsitivity. Study using of fatigue of welded components and structures, Senlis, France.
Medsen, H.O., Sorensen & J.D., Olesen, R.1989 Optimal inspections planning for fatigue damage of offshore structures (Proceeding ICOSSAR-98), San-Francisco.