

## FATIGUE ET INSPECTIONS DES STRUCTURES FIXES OFFSHORES

**Michel BIRADES,**

Total – CSTJF, Avenue Larribau, Pau (France)

**Laurent VERNEY**

Bureau Veritas – Marine & Offshore, Paris La Défense (France)

### SOMMAIRE

La priorisation des inspections sous-marines des structures fixes offshore intègre la conséquence d'une rupture, l'évaluation des niveaux de fatigue et les résultats des précédentes inspections. Le calcul en fatigue a donc un poids important dans cette priorisation et les calculs au long de la vie d'une plateforme doivent désormais considérer : les différentes phases d'exploitation, le nettoyage des bio-salissures marines et l'évolution des techniques de calcul de la fatigue des connexions tubulaires soudées. Cet article présente les expériences de TOTAL et de BUREAU VERITAS pour des extensions de durée de service, en discutant de l'influence des épaisseurs de bio-salissures et plus généralement des paramètres influant sur le calcul en fatigue.

### SUMMARY

The prioritization of underwater inspections for offshore fixed structures considers the consequence of a failure, fatigue assessment and the results of previous inspections. Therefore fatigue analyses have a significant weight in this prioritization and calculations during the lifecycle of the platform must now include: the different phases of operations, the cleaning of marine growth and the evolution of calculation techniques for the fatigue of tubular welded connections. This article presents the experiences of TOTAL and BUREAU VERITAS for lifetime extension and discusses the influence of marine growth thicknesses and more generally parameters governing fatigue reassessment.

### 1. INTRODUCTION

Les développements de l'industrie offshore ont nécessité de prolonger l'exploitation de plateformes offshore fixes existantes. Les structures sont alors plus chargées et peuvent même avoir atteint leur durée de vie initiale.

Pour ces structures offshore fixes, l'analyse de fatigue et le plan d'inspections de la partie structurelle sous-marine (le jacket) doivent être mis à jour.

Sur la base de l'expérience de plus de 40 ans de TOTAL et BUREAU VERITAS en Mer du Nord, cet article présentera d'abord un plan d'inspection typique en détaillant aussi la

problématique de l'évaluation de l'épaisseur des bio-salissures marines pour des eaux plus chaudes et le phasage de l'exploitation de l'installation offshore.

Ensuite, l'analyse de la fatigue est résumée en mettant l'accent sur les changements de méthodologies de calcul rencontrées tout au long de la durée de vie et on discutera enfin les principaux paramètres objets des derniers travaux de l'industrie pour fiabiliser l'extension de durée de vie de ces structures offshore soudées.

## 2. PLAN D'INSPECTIONS

### 2.1. L'exemple TEPNL

L'inspection des structures offshore de la filiale Hollandaise de Total (TEPNL, Total Exploration Production Netherland) est réglementée par la loi minière: l'article 7.2 section 2G du Règlement sur l'exploitation minière de janvier 2003 requiert une inspection tous les 5 ans des «soudures critiques des nœuds tubulaires» de la partie sous-marine de la plate-forme (jacket).

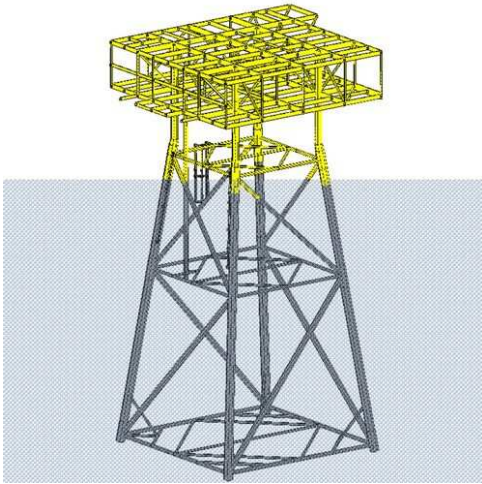


Figure 1: Exemple de structures de TEPNL

Considérant que l'objectif principal de tout plan d'inspection est de fournir un niveau de confiance dans l'état de chaque composant structurel en relation avec la conséquence de sa rupture éventuelle, une approche spécifique a été développée pour l'inspection des soudures sous-marines. Cette approche (appelée «ABCD», voir plus bas) est présentée sous la forme d'un organigramme à la figure 2.

L'organigramme décrit les principales considérations qui influent sur le programme d'inspection. L'évaluation de l'importance de l'inspection d'une soudure dans un cycle d'inspection donné est fonction :

- De la conséquence de la rupture
- De la probabilité de rupture
- De l'historique de l'inspection des soudures

L'approche décrite dans l'organigramme doit prendre en compte toutes les informations disponibles, en particulier les résultats d'ingénierie et d'inspection.

Après chaque inspection, de nouvelles pondérations peuvent être attribuées en fonction des résultats. La table de classement des soudures à inspecter (révisée) est ensuite utilisée pour la prochaine inspection.

Le programme d'inspection couvre toutes les soudures sous-marines mais inclut également celles du jacket au-dessus du niveau de l'eau.

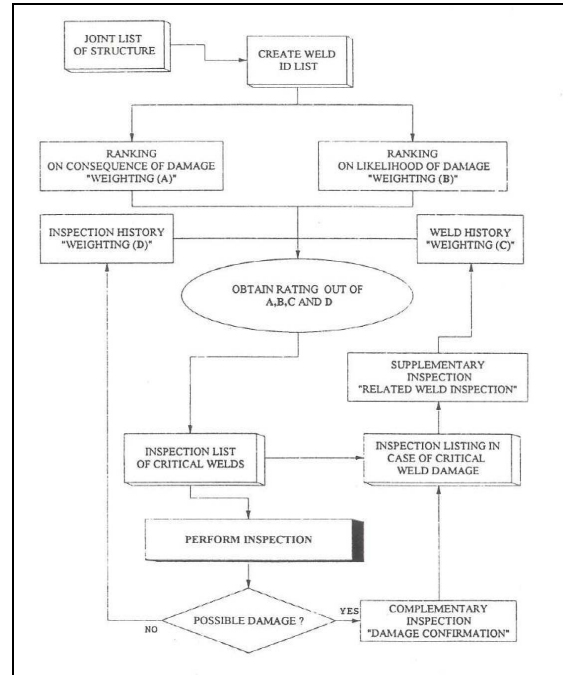


Figure 2. Organigramme de la méthode 'ABCD'

### 2.2. Détails de l'approche 'ABCD'

#### 2.2.1. Détermination de la criticité des nœuds tubulaires

La criticité d'un nœud tubulaire est définie par la formule suivante :

$$TOT = (A) \cdot (B) \cdot (C) + (D) \quad (1)$$

Les nœuds tubulaires sont ordonnés selon leur criticité, ce qui permet de déterminer la liste des nœuds à inspecter. La procédure d'inspection est illustrée figure 3.

Les termes A, B, C et D sont calculés comme expliqué dans les sections suivantes.

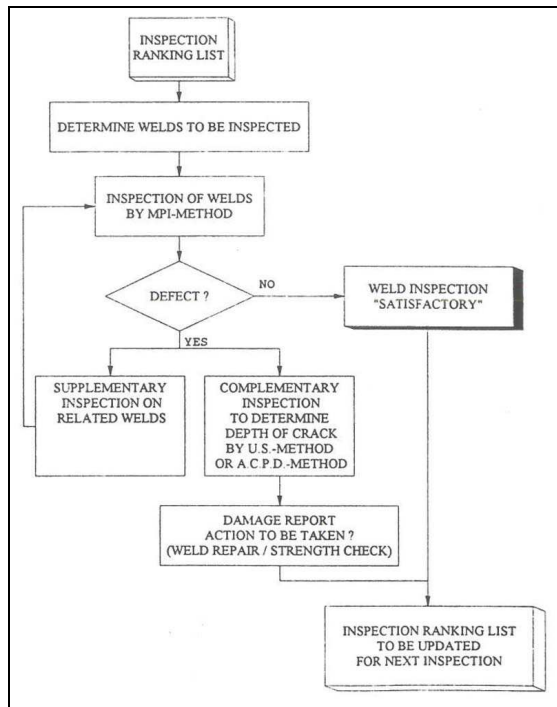


Figure 3. Procédure générale d'inspection

### Conséquence d'une rupture (A)

L'objet de ce paramètre (A) est de classer les soudures des nœuds tubulaires d'un jacket selon leur importance pour la stabilité globale et l'intégrité de la structure. On distingue les soudures primaires, secondaires ou tertiaires.

Les scores de pondération sont indiqués dans la Table 1.

Table 1. Score de pondération de la criticité des soudures (A)

Description	(A)
Soudure principale	1
Soudure secondaire	2.5
Soudure tertiaire	10

### Probabilité d'une rupture (B)

La probabilité de rupture d'une soudure est fonction de la contrainte et du dommage de fatigue accumulé.

Mais dans la mesure où les inspections sous-marines se focalisent sur la recherche de fissure, le critère de sélection est uniquement le dommage de fatigue, traduit sous la forme Durée de vie en fatigue de la soudure :

$$(B) = DUREE\ de\ VIE \quad (2)$$

Toutefois, dans le cas de durées de vie en fatigue similaires sur plusieurs soudures, le niveau de contrainte servira de critère

discriminant complémentaire pour la classification.

### Historique de la soudure (C)

L'objectif de ce critère est de distinguer les soudures selon qu'une fissure a été détectée ou non et réparée par meulage ou non, avec succès ou non.

Les scores de pondération sont indiqués dans la Table 2.

Table 2. Score de pondération de l'historique de la soudure (C)

Description	(C)
Pas de fissure détectée	1.0
Détection d'une fissure $\leq 5$ mm et pas de meulage de la fissure	0.5
Détection d'une fissure $> 5$ mm et pas de meulage de la fissure	0.0
Détection d'une fissure, mais soudure correcte après meulage de la fissure	1.0
Détection d'une fissure, mais meulage insuffisant pour obtenir une soudure correcte.	0.0

### Historique d'inspection (D)

L'objectif de ce critère est de favoriser l'inspection des soudures qui n'ont pas été inspectées lors des précédents cycles d'inspection.

Les scores de pondération sont indiqués dans la Table 3.

Table 3. Score de pondération de l'historique d'inspection des soudures (D)

Description	(D)
Soudure inspectée et aucune fissure de détectée	$10\% \times ([A] \cdot [B])$
Toutes les autres soudures	0.0

#### **2.2.2. Nœuds associés**

Si, lors d'une inspection, des fissures sont détectées sur une soudure, les soudures connexes du même nœud doivent aussi être vérifiées. De même les soudures similaires dans la structure doivent être ajoutées dans la liste des soudures à inspecter.

#### **2.2.3. Elaboration de la liste des nœuds à inspecter**

Pour obtenir le nombre de soudures à inspecter, on utilise les consignes suivantes:

- 1) Si le score de classement est inférieur ou égal à 5 fois la durée de vie, la soudure est soumise à une inspection. Le facteur de sécurité de 5 permet de couvrir l'inspection des soudures secondaires lorsque leur durée de vie en fatigue est égale ou inférieure à 2 fois la durée de vie prévue pour la plate-forme.
- 2) Sélection aléatoire : le nombre de soudures par sélection aléatoire est égal à 20% du nombre de soudures obtenues en (1). Toutefois, étant donné que la partie supérieure du jacket (au-dessus du niveau de la mer) est facilement accessible, les soudures à ce niveau peuvent être inspectées systématiquement à chaque campagne d'inspection. De ce fait, la sélection aléatoire s'applique uniquement aux soudures situées sous le niveau de la mer. Et, pour des raisons d'accès pratiques, les soudures situées dans le niveau le plus bas du jacket, en contact avec le sol, sont évitées si leur score faible.
- 3) Nombre minimum de soudures : le nombre total de soudures obtenues en (2) doit être égal ou supérieur au nombre minimal de soudures requis pour la sélection. Ce minimum dépend de la taille de la plate-forme et représente 5% du nombre de soudures primaires.

### 2.3. Exemple d'application de la méthode ABCD

Un exemple d'application de la méthodologie 'ABCD' est donné sur une plate-forme typique de TEPNL : un jacket à 4 jambes, soutenu par des piles fichées à une profondeur de 72,00 m, et illustrée à la figure 1.

La date d'installation est 1994. La durée de vie anticipée est de 2034 (40 ans). Les dommages de fatigue sont calculés selon les méthodologies présentées dans les sections 5 à 6. La Table 4 présente les nœuds tubulaires ayant les dommages de fatigue les plus élevés, avec la durée de vie associée.

Le plan d'inspection élaboré selon la méthodologie 'ABCD' est donné à la Table 5. Les nœuds tubulaires avec un classement

(A). (B). (C) + (D) > 200 (5 x 40 ans) y sont indiqués. Les nœuds tubulaires au-dessus du niveau de l'eau faciles à inspecter,

sont également systématiquement inclus dans la liste des nœuds à inspecter.

Table 4. Dommages de fatigue calculés

Noeud	Membre	Dommage passé	Dommage futur	Dommage 1994-2034	Durée de vie (Années)
259	259-295	0,28	2,42	2,70	26
119	119-211	0,52	2,14	2,66	25
259	215-259	0,27	2,38	2,65	26
259	251-259	0,21	1,90	2,11	28
251	251-295	0,18	1,58	1,76	30
251	251-212	0,15	1,34	1,49	33
251	251-259	0,09	0,91	1,00	40
191	191-299	0,20	0,60	0,80	47
111	111-291	0,08	0,60	0,68	51
115	115-151	0,09	0,50	0,59	56
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Table 5. Plan d'inspection

Noeud	Membre	(A).(B).(C) + (D)	2018	2023	2028	2033
119	119-211	25	○	○	○	○
191	191-299	47	○	○	○	○
111	111-291	51	○	○	○	○
259	259-295	65	●		●	
259	215-259	65	●		●	
259	251-259	71	●		●	
251	251-295	76	●	●		
251	251-212	82	●	●		●
111	111-115	104	○	○	○	○
211	211-231	105		●		●
251	251-259	110		●		
199	199-219	110	○	○	○	○
115	115-151	141	○	○	○	○
291	291-251	141	●			●
115	115-159	142	○	○	○	○
219	199-219	169			●	
211	211-119	181			●	

● Au-dessus du niveau de l'eau ○ Sous le niveau de l'eau

### 3. ÉPAISSEURS DE BIO-SALISSURES

Afin de permettre l'évaluation des dommages de fatigue, l'évolution de l'épaisseur de bio-salissures au cours du temps doit être calculée pour toutes les phases de la durée de vie de la plate-forme (Cf. Section 4).

De l'installation à la date actuelle (période «passée»), l'épaisseur de bio-salissures est élaborée à partir des rapports d'inspection passés, avec interpolation entre inspections. L'épaisseur de bio-salissures de la date actuelle à la durée de vie anticipée (période «future») est extrapolée (exemples des figures 4 et 5).

Si, à un moment donné, la courbe «Epaisseur de bio-salissures en fonction du temps» est supérieure à la valeur maximale admissible (qui doit être définie par une analyse de sensibilité effectuée lors d'analyses en place de résistance à des vagues extrêmes), la courbe est adaptée pour refléter un nettoyage de la structure du jacket à ce moment-là.

### 3.1. Impact des bio-salissures sur les analyses en fatigue

Les sections transversales de tous les éléments de la structure (membres, conducteurs, risers, accessoires) sont augmentées en fonction des épaisseurs de bio-salissures. Le diamètre effectif d'un élément est  $\varnothing = \varnothing_c + 2t$ , où  $\varnothing_c$  est le diamètre extérieur sans bio-salissures et  $t$  est l'épaisseur de bio-salissures.

Selon la zone géographique, l'épaisseur de bio-salissures peut être significative et avoir un impact majeur sur la durée de vie à la fatigue, en raison de l'augmentation de la surface de l'écran aux vagues et aux courants.

Si l'épaisseur de bio-salissures est différente chaque année, le dommage par fatigue est également différent chaque année. Pour éviter d'effectuer autant d'analyses de fatigue que le nombre d'années d'une période donnée, une épaisseur de bio-salissures moyenne constante est utilisée pendant la période considérée et calculée comme suit.

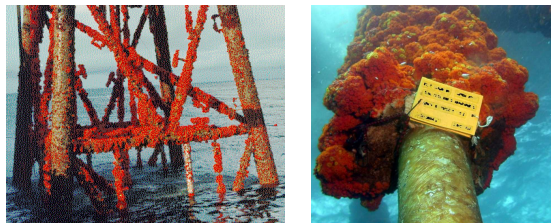


Figure 4. Exemple de bio-salissures sur les membres d'un jacket

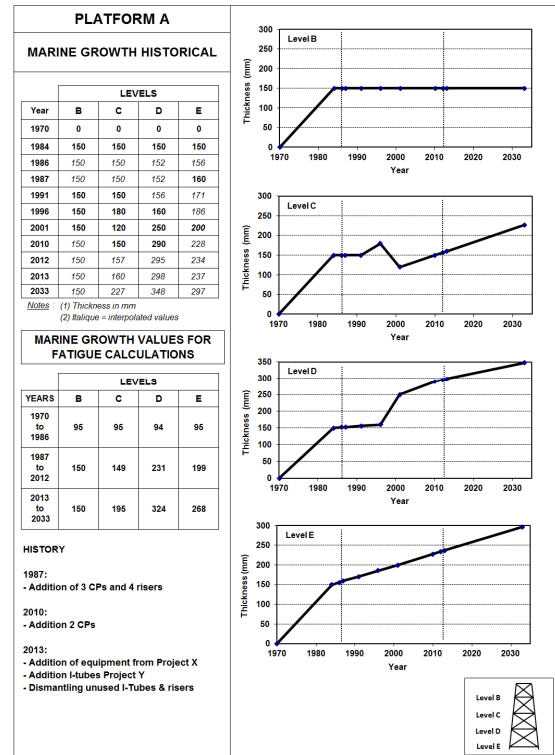


Figure 5. Exemple d'évolution des bio-salissures avec le temps et valeur moyenne pour chaque période

### 3.2. Calcul d'une épaisseur moyenne de bio-salissures

La Table 6 illustre le calcul du dommage de fatigue total  $D_T$  durant  $Y$  années sur un membre de diamètre sans bio-salissure  $\varnothing_c$ . Ce membre a une épaisseur de bio-salissures  $t_i$  à l'année  $i$ , et est sujet chaque année  $i$  à  $n$  cycles de contraintes d'amplitude  $S_i$ , et cela pendant  $Y$  années.

Selon l'équation de Morison donnée dans ISO 19902 [1], la force hydrodynamique  $F$  sur un membre de diamètre  $\varnothing$  est la somme de la force de traînée  $F_d$  et de la force d'inertie  $F_i$  :

$$F = F_d + F_i$$

$$= C_d \cdot \frac{1}{2} \rho_w U \cdot |U| \cdot \phi + C_m \cdot \rho_w \pi \frac{\phi^2}{4} \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \quad (3)$$

La force de traînée est proportionnelle à  $\varnothing$  et la force d'inertie est proportionnelle à  $\varnothing^2$ .

Table 6. Calcul du dommage total de fatigue  $D_T$  pendant  $Y$  années sur un membre de diamètre sans bio-salissure  $\emptyset_c$  avec une épaisseur de bio-salissure  $t_i$  à l'année  $i$ .

An	Ep. $t$	Diamètre $\emptyset$	Amplitude contraintes $S$	Nbr de cycles à la rupture $N$	Dommage $D$
1	$t_1$	$\emptyset_1 = \emptyset_c + 2t_1$	$S_1 = \lambda \cdot \emptyset_1^p$	$N_1 = k \cdot (S_1)^{-m}$	$D_1 = n/N_1$
2	$t_2$	$\emptyset_2 = \emptyset_c + 2t_2$	$S_2 = \lambda \cdot \emptyset_2^p$	$N_2 = k \cdot (S_2)^{-m}$	$D_2 = n/N_2$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<b>i</b>	<b>t<sub>i</sub></b>	<b><math>\emptyset_i = \emptyset_c + 2t_i</math></b>	<b><math>S_i = \lambda \cdot \emptyset_i^p</math></b>	<b><math>N_i = k \cdot (S_i)^{-m}</math></b>	<b><math>D_i = n/N_i</math></b>
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<b>Y</b>	<b><math>T_Y</math></b>	<b><math>\emptyset_p = \emptyset_c + 2t_Y</math></b>	<b><math>S_p = \lambda \cdot \emptyset_Y^p</math></b>	<b><math>N_Y = k \cdot (S_Y)^{-m}</math></b>	<b><math>D_Y = n/N_Y</math></b>
$p = 1$ pour le terme de trainée de l'équation de Morison					<b><math>D_T = \sum D_i</math></b>
$= 2$ pour le terme d'inertie de l'équation de Morison					

En conséquence, l'amplitude des contraintes est proportionnelle au diamètre effectif  $\emptyset_i (= \emptyset_c + 2t_i)$  pour la partie de trainée et au carré du diamètre effectif pour la partie inertie. Par conséquent, à l'année  $i$  :

$$S_i = \lambda \phi_i^p \quad (4)$$

Avec :

$\lambda$  est une constante

$p = 1$  pour le terme de trainée de l'équation de Morison

$= 2$  pour le terme d'inertie de l'équation de Morison

D'après la courbe S-N donnée dans l'ISO 19902 [1], le nombre de cycles à la rupture par fatigue  $N_i$  à l'année  $i$  est donné par :

$$N_i = k S_i^{-m} \quad (5)$$

Avec :

$k$  est une constante

$m$  est l'inverse de la pente de la courbe S-N

Selon la définition donnée dans l'ISO 19902 [1], le dommage de fatigue  $D_i$  à l'année  $i$  est donné par :

$$D_i = \frac{n}{N_i} \quad (6)$$

Avec :

$n$  est le nombre de cycles annuel d'amplitude de contraintes  $S_i$

Le dommage de fatigue total  $D_T$  pendant  $Y$  années est la somme des  $Y$  dommages annuels  $D_i$  :

$$D_T = \sum_{i=1}^Y D_i \quad (7)$$

D'après les équations (4) à (7) :

$$D_T = \frac{n \lambda^m}{k} \sum_{i=1}^Y (\phi_i^p)^m \quad (8)$$

En considérant que  $\emptyset_i = \emptyset_c + 2t_i$ , il vient finalement :

$$D_T = \frac{n \lambda^m \phi_c^{p \cdot m}}{k} \sum_{i=1}^Y \left(1 + 2 \frac{t_i}{\phi_c}\right)^{p \cdot m} \quad (9)$$

La valeur moyenne d'épaisseur de bio-salissures  $t_{ap}$  ( $p=1$  pour le terme de trainée et  $p=2$  pour le terme d'inertie) est définie par la valeur, constante dans le temps, d'épaisseur de bio-salissures qui génère le même dommage de fatigue total  $D_T$  pendant  $Y$  années :

$$D_T = \frac{n \lambda^m \phi_c^{p \cdot m}}{k} Y \left(1 + 2 \frac{t_{ap}}{\phi_c}\right)^{p \cdot m} \quad (10)$$

D'après les équations (9) et (10) :

$$Y \left(1 + 2 \frac{t_{ap}}{\phi_c}\right)^{p \cdot m} = \sum_{i=1}^Y \left(1 + 2 \frac{t_i}{\phi_c}\right)^{p \cdot m} \quad (11)$$

$t_{ap}$  peut être obtenu à partir de l'équation (11) :

$$t_{ap} = \frac{\phi_c}{2} \left( \left[ \frac{B}{Y} \right]^{1/p \cdot m} - 1 \right) \quad (12)$$

avec

$$B = \sum_{i=1}^Y \left(1 + 2 \frac{t_i}{\phi_c}\right)^{p \cdot m} \quad (13)$$

Finalement, il est proposé que la valeur moyenne, constante dans le temps, d'épaisseur de bio-salissures  $t_a$  à utiliser pendant la période de  $Y$  années soit la valeur moyenne entre  $t_{a1}$  et  $t_{a2}$  :

$$t_a = \frac{t_{a1} + t_{a2}}{2} \quad (14)$$

Cette proposition est justifiée par l'analyse de sensibilité de la section suivante.

Il est à noter que cette valeur moyenne d'épaisseur de bio-salissures  $t_a$  est

significativement différente de la valeur moyenne arithmétique habituelle, *Mean*, définie par :

$$Mean = \frac{1}{Y} \sum_{i=1}^Y t_i \quad (15)$$

En outre, à chaque niveau où des bio-salissures doivent être prises en compte, il est suggéré d'utiliser la valeur moyenne des diamètres des différents membres au niveau concerné. Cela permettra d'éviter de définir une  $t_a$  spécifique pour chaque diamètre au même niveau.

### 3.3. Analyses de sensibilité

#### Profils de bio-salissures

Quatre profils d'épaisseur de bio-salissures (*MG*) ont été définis (Cf. figure 6):

- Profil 1: augmentation rapide de l'épaisseur de 0 à 200 mm pendant 15 ans,
- Profil 2: augmentation en « courbe en S » de l'épaisseur de 0 à 200 mm pendant 15 ans,
- Profil 3: identique au profil 1, mais avec nettoyage à l'année 7. Après l'année 7, l'épaisseur augmente comme le profil 1 à l'année 0,
- Profil 4: identique au Profil 2, mais avec nettoyage à l'année 7. Après l'année 7, l'épaisseur augmente comme le Profil 2 à l'année 0.

Les tables 7 à 10 résument les résultats des différentes analyses de sensibilité détaillées ci-après.

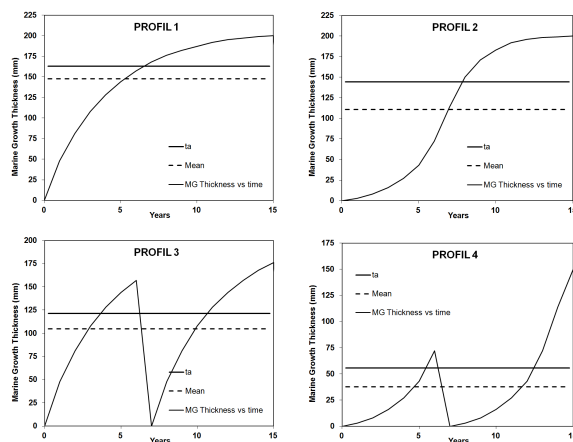


Figure 6. Profils d'épaisseurs de bio-salissures en fonction du temps, avec indication de *Mean* et  $t_a$  (calculé pour  $m=4$  and  $\varnothing_c=20''$ )

#### Comparaison de $t_a$ avec *Mean*

Sur chaque courbe de la figure 6, on indique la valeur moyenne de bio-salissures  $t_a$ , ainsi que la moyenne arithmétique *Mean*.  $t_a$  est calculé pour une pente de fatigue  $m = 4$  et un diamètre d'élément typique  $\varnothing_c = 20$  in.

Il apparaît que  $t_a$  est toujours significativement plus élevé que *Mean*. Une comparaison plus quantifiée est donnée à la figure 7 ; cette figure indique le pourcentage d'augmentation de  $t_a$  par rapport à *Mean*. La comparaison est faite pour les quatre profils sélectionnés et pour quatre diamètres typiques: 8, 12, 20 et 30 in.

$t_a$  est de 10% à 90% plus élevé que *Mean*, selon le diamètre de l'élément et le profil d'épaisseur de bio-salissures. Cela justifie l'utilisation de  $t_a$  au lieu de *Mean* pour éviter un sous conservatisme des analyses de fatigue.

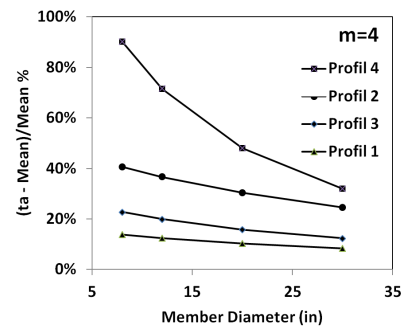


Figure 7. Comparaison de  $t_a$  et *Mean* (%) pour les différents profils

#### Sensibilité de la pente de fatigue $m$

La figure 8 compare  $t_a$  pour différentes valeurs de la pente de fatigue  $m$ , qui varie généralement de 3 à 5. La comparaison est faite pour les quatre profils différents et pour les quatre diamètres typiques.

Il apparaît qu'une augmentation de  $m$  augmente  $t_a$ , mais la variation est relativement faible.

Il est donc suggéré de calculer  $t_a$  avec  $m = 4$

#### Comparaison des termes d'inertie de traînée $t_{a1}$ & $t_{a2}$ avec $t_a$

La figure 9 compare  $t_{a1}$  et  $t_{a2}$  avec  $t_a$ . La comparaison est faite pour les quatre profils différents et pour les quatre diamètres typiques (avec  $m = 4$  comme suggéré ci-dessus).

Il apparaît que  $t_{a1}$  et  $t_{a2}$  sont très proches de  $t_a$ . Cela justifie la définition de  $t_a$  comme étant la valeur moyenne entre  $t_{a1}$  et  $t_{a2}$ . Cela permet également de ne pas se préoccuper de savoir quel terme dans l'équation de Morison est prédominant.

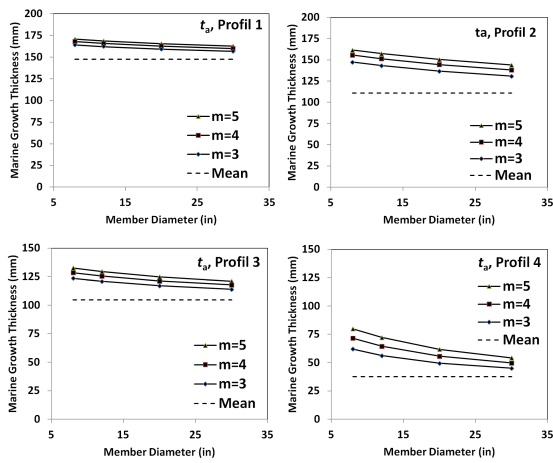


Figure 8. Sensibilité de la pente de fatigue  $m$  sur l'épaisseur moyenne de bio-salissures  $t_a$  pour différents profils

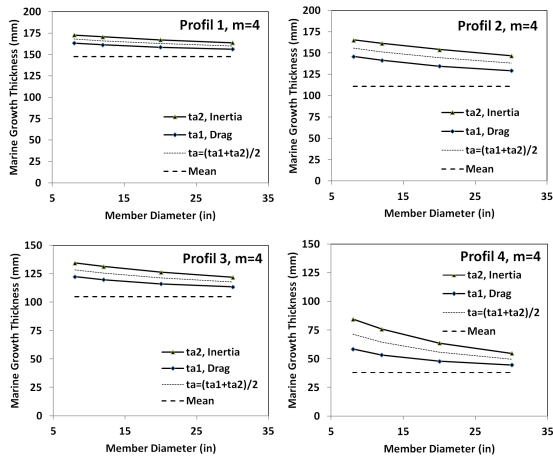


Figure 9. Sensibilité des termes de traînée et d'inertie ( $t_{a1}$  &  $t_{a2}$ ) autour de  $t_a$  pour les différents profils

Table 7. Epaisseurs moyennes  $t_a$  de bio-salissures Profil 1

Diam. (in)	m	$t_{a\ p=1}$	$t_{a\ p=2}$	$t_a$	$t_{Mean}$
8	3	159	169	164	148
8	4	163	173	168	148
8	5	166	176	171	148
12	3	158	167	162	148
12	4	161	171	166	148
12	5	164	174	169	148
20	3	155	163	159	148
20	4	158	167	163	148
20	5	161	170	166	148
30	3	154	160	157	148
30	4	156	164	160	148
30	5	159	167	163	148

Table 8. Epaisseurs moyennes  $t_a$  de bio-salissures Profil 2

Diam. (in)	m	$t_{a\ p=1}$	$t_{a\ p=2}$	$t_a$	$t_{Mean}$
8	3	137	158	148	111
8	4	146	165	156	111
8	5	153	170	162	111
12	3	133	153	143	111
12	4	141	161	151	111
12	5	148	167	157	111
20	3	128	146	137	111
20	4	135	154	144	111
20	5	141	160	150	111
30	3	124	138	131	111
30	4	129	147	138	111
30	5	134	153	144	111



Table 9. Epaisseurs moyennes  $t_a$  de bio-salissures Profil 2

Diam. (in)	m	$t_{a\ p=1}$	$t_{a\ p=2}$	$t_a$	$t_{Mean}$
8	3	118	130	124	105
8	4	122	135	129	105
8	5	126	139	132	105
12	3	115	126	121	105
12	4	120	132	126	105
12	5	123	135	129	105
20	3	113	122	117	105
20	4	116	127	121	105
20	5	119	130	125	105
30	3	111	117	114	105
30	4	113	122	118	105
30	5	116	126	121	105

Table 10. Epaisseurs moyennes  $t_a$  de bio-salissures Profil 2

Diam. (in)	m	$t_{a\ p=1}$	$t_{a\ p=2}$	$t_a$	$t_{Mean}$
8	3	51	73	62	38
8	4	59	85	72	38
8	5	66	94	80	38
12	3	48	65	56	38
12	4	53	76	65	38
12	5	59	85	72	38
20	3	44	55	49	38
20	4	48	64	56	38
20	5	52	72	62	38
30	3	42	48	45	38
30	4	45	55	50	38
30	5	47	61	54	38

#### 4. PHASES DE LA VIE D'UNE PLATE-FORME

Une plate-forme offshore peut être utilisée dans des conditions différentes dans le temps. L'analyse de la fatigue du jacket doit donc être effectuée selon la séquence suivante:

- Définition de périodes spécifiques au fil du temps, de l'installation à la durée de vie anticipée. Une nouvelle période est définie quant intervient une modification majeure de la plate-forme, comme l'ajout de conduites, de risers, l'ajout de poids

significatifs sur le pont (équipement, extension, ... conduisant à une modification de la fréquence propre de la plate-forme).

- Définition, pour chaque période, d'une valeur moyenne constante d'épaisseur de bio-salissures,  $t_a$ , à prendre en compte pour les calculs de fatigue. La méthode utilisée pour calculer cette valeur moyenne  $t_a$  est donnée dans la section 3.
- Calcul, pour chaque nœud et pour chaque période, des dommages de fatigue, conformément à ISO 19902 [1] et en tenant compte de la flexibilité des nœuds [2].
- Calcul, pour chaque nœud, des dommages de fatigue de l'installation à la date actuelle (somme des dommages de fatigue des périodes passées), de la date actuelle à la durée de vie anticipée (dommages pendant la période future) et de l'installation à la durée de vie anticipée (dommage total = somme des dommages de toutes les périodes).
- Calcul, pour chaque nœud, de la durée de vie en fatigue, qui doit être calculée comme le moment où la courbe du dommage de fatigue en fonction du temps atteint un dommage de 1,0.

La figure 10 illustre la méthodologie, avec trois périodes passées et une période future.

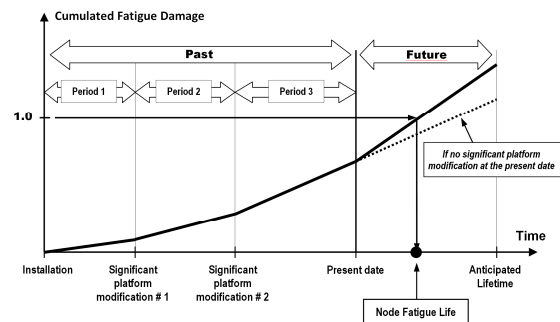


Figure 10. Principe d'accumulation de dommages de fatigue sur un nœud tubulaire de jacket

#### 5. CALCUL DE FATIGUE

##### 5.1. Méthode du point chaud (« hot spot »)

La fatigue des nœuds tubulaires soudés offshore est basée sur une approche où la contrainte de conception est la contrainte

géométrique ou «hot spot» (point chaud) comme illustré sur la figure 11.

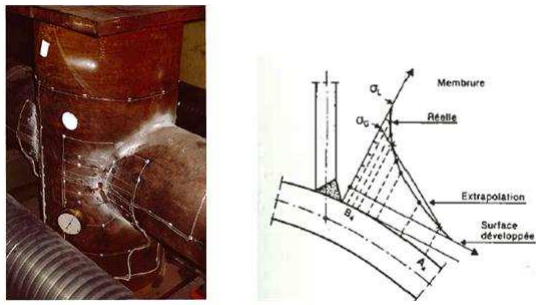


Figure 11. Tests en fatigue de connexions tubulaires et mesure du point chaud

En pratique, des mesures avec des jauges ont été effectuées dans les années 80 sur des tests de joints tubulaires représentatifs (voir référence [7]). La contrainte principale maximale est extrapolée au pied du cordon de soudure à partir des points des mesures réalisées à l'extérieur de la zone d'influence de la discontinuité créée par la présence de la soudure.

## 5.2. SCF et courbes de fatigue

Pour chaque nœud tubulaire, la contrainte du point chaud est déterminée à l'aide de formules paramétriques calibrées sur les mesures effectuées dans les années 80 et des modèles éléments finis. Cette approche paramétrique fournit le facteur de concentration de contrainte pour le mode de chargement considéré (axial, flexion dans le plan, flexion hors du plan) et le type de nœuds (T/Y, K, KT, X). Ces paramètres sont appelés *facteurs de concentration de contrainte* (SCF pour « stress concentration factor ») et permettent d'évaluer l'étendue de contrainte de fatigue de n'importe quelle soudure. Les équations d'Efthymiou sont maintenant recommandées par la plupart des codes, notamment l'ISO 19902 [1] où sont aussi décrits l'effet de longueur de membrure et les domaines de validité de ces équations pour extrapoler les contraintes au pied des cordons de soudure de chaque nœud.

Les mesures effectuées dans les années 80 ont surtout permis de construire une courbe de fatigue pour les nœuds tubulaires offshore dont les soudures sont pleinement pénétrées et réalisées selon les critères de l'AWS D1.1. La

figure 12 montre les points de mesure et la courbe moyenne de pente -1/3.

Deux approches réglementaires ont existées : une approche enveloppe (voir courbe API 2002) et une approche probabiliste, dite « à deux écarts-type » (voir courbe API 2005).

Depuis 2005, l'ISO 19902 [1] et l'API (« American Petroleum Institute ») ont adopté la même courbe SN (voir courbe WJ sur la Figure 12) avec un facteur de correction d'épaisseur visant à sévérer la résistance en fatigue des tubes de plus fortes épaisseurs, comme observé expérimentalement.

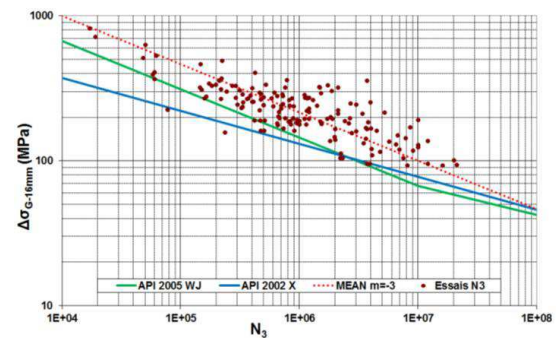


Figure 12: Courbes de Fatigue

## 5.3. Principes d'un calcul de fatigue

La fatigue est une accumulation de dommages causés par l'application répétée de contraintes variables dues aux houles sur la structure.

Avant l'approche probabiliste, basée sur un spectre de houle ou encore appelée approche spectrale, l'environnement était décrit par des vagues individuelles déterministes. Cette approche, avec une distribution annuelle, est généralement mise en œuvre dans des calculs quasi statiques. Pour tenir compte de la nature aléatoire et du contenu en fréquence des vagues réelles, l'approche spectrale est désormais recommandée. Pour l'approche probabiliste sur une structure fixe, il convient de considérer 8 directions avec au moins 15 vagues par direction et pour chacune de calculer au minimum 12 phases. L'approche spectrale étant dans le domaine fréquentiel (c'est-à-dire linéaire), elle intègre une phase de linéarisation (voir section 5.4).

Pour tenir compte des non-linéarités, la méthode temporelle, comme appliquée pour les unités flottantes, pourrait être une

alternative, mais cela n'est presque jamais utilisé pour les structures fixes,

Enfin pour le calcul de fatigue, le modèle poutres 3D utilisé pour les calculs de dimensionnement sous les charges extrêmes est réutilisé. Fondamentalement, les poutres sont connectées aux nœuds où l'élément continu s'appelle la membrure (« chord »), et les barres qui y sont soudées sont appelées les entretoises (« braces »). C'est à ces assemblages que les soudures tubulaires peuvent être sujettes à la fatigue et qu'il convient donc d'y calculer la contrainte géométrique (point chaud défini en section 5.1).

#### 5.4. Linéarisation et fonction de transfert

La méthode déterministe à partir d'une distribution annuelle et des calculs quasi statiques ne nécessite pas de linéarisation, mais la méthode probabiliste (ou spectrale) nécessite une linéarisation, car cette approche en fréquence est par essence linéaire.

L'analyse globale qui produit les contraintes nominales dans les poutres 3D nécessite donc une linéarisation des actions hydrodynamiques (le terme de trainée étant au carré dans l'équation de Morison), des effets de submersion variable (pour les poutres à la surface qui sont alternativement dans l'eau ou dans l'air) et l'interaction non-linéaire de la structure avec le sol.

La linéarisation se fait implicitement lors de la sélection des vagues pour le calcul de réponse. Il faut donc porter une grande attention à cette phase lors du choix des hauteurs des vagues pour la détermination des fonctions de transfert ou RAO (« Response Amplitude Operator »).

L'ISO 19902 [1] propose une recette basée sur le centre de dommage. Après une linéarisation de la résistance du sol au centre du diagramme de distribution des états de mer, c'est une cambrure constante de houle (rapport de la hauteur à la longueur variant généralement de 1/15 à 1/25) qui est le plus souvent utilisée pour choisir les hauteurs de vague utilisées pour chaque fréquence / période. Comme cette cambrure constante conduit à des hauteurs de vagues irréalistes aux fréquences des fortes vagues, une hauteur maximale égale à la

valeur limite dans la distribution des états de mer est également communément implémentée.

Pour valider l'échantillonnage de vagues de cambrure constante, il est conseillé de vérifier (qualitativement) que l'échantillonnage permet de décrire les pics et vallées de la fonction de transfert afin que les interpolations soient bien réalisées, notamment au voisinage des fréquences propres de la structure fixes. En outre le spectre de réponse de la structure est ensuite calculé sous forme de distribution de Rayleigh à partir de ces fonctions de transfert.

## 6. PARAMETRES INFLUANT SUR LA FATIGUE

### 6.1. Extension de durée de vie

L'objectif de l'extension de durée de vie est de continuer à exploiter une plate-forme offshore dans des conditions de sécurité satisfaisantes alors qu'elle a atteint sa durée de vie initiale de service (voir l'article [6]).

Le calcul en fatigue est un paramètre important du plan d'inspection (voir section 2.2.1) et il doit être effectué selon le phasage défini en section 4.

La reprise du calcul de fatigue pour intégrer les résultats d'inspections (mesures de bio-salissures marine, etc.) et estimer les dommages pour l'extension de la durée de vie anticipée peut poser des difficultés pour quelques nœuds où le calcul de fatigue peut parfois générer des dommages élevés voire irréalistes. Ceci peut résulter :

- des données environnementales (mesure des bio-salissures marines et des états de mer) disponibles et extrapolées (voir l'article [4] pour l'extrapolation des bio-salissures) sur la durée anticipée d'exploitation de la plate-forme,
- du modèle hydrodynamique, en particulier pour les petites houles (voir section 6.2),
- de la méthode d'évaluation de la fatigue,
- de la qualité des soudures (longueur des pieds de cordons de soudure, etc.) et plus généralement du contrôle des soudures.

L'influence des trois derniers paramètres est présentée dans la section 6.3.

## 6.2. Chargement et coefficients hydrodynamiques

Pour les vagues extrêmes, quelques instrumentations ont été effectuées. À titre d'exemple, l'article OTC 13193 [3] a confirmé les coefficients hydrodynamiques en retrouvant la même réponse extrême que les mesures effectuées sur les plates-formes Ekofisk en Norvège.

C'est la seule instrumentation où, dans une seconde phase dédiée à la fatigue, les partenaires du champ Ekofisk ont étudié plus de 400 états de mer ; leur conclusion montre que la meilleure corrélation des courbes d'étendues de contraintes déduites des mesures a été trouvée pour un coefficient hydrodynamique d'inertie  $C_m$  à une valeur de 1,6 pour le calcul de fatigue. Cette conclusion tend à confirmer le conservatisme dû au  $C_m$  réglé sur la valeur théorique ( $C_m = 2,0$  en fatigue selon l'ISO 19902 [1]) pour les cylindres lisses et rugueux. En fatigue, la plupart des vagues ont une hauteur inférieure à celle des vagues extrêmes de période de retour 1 an pour lesquelles les calculs de charges extrêmes annuelles sont faits avec  $C_m = 1,6$  pour les membres lisses et 1,2 pour les membres rugueux (avec bio-salissures marines).

## 6.3. Études de sensibilité

BUREAU VERITAS et TOTAL ont effectué des études de sensibilités sur une plate-forme de TOTAL Gabon et plus particulièrement sur un nœud qui sera notre référence (voir figure 13), présentant un fort dommage de fatigue par le calcul, mais dont les inspections ne révèlent aucune anomalie (voir figure 14).

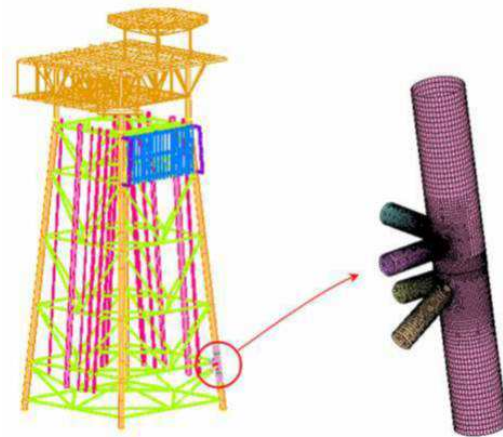


Figure 13: Modélisation du nœud de référence

Afin d'avoir une modélisation permettant de modifier plus explicitement certains paramètres dans le modèle 3D, la méthode d'évaluation de la fatigue par l'approche point chaud (« hot spot ») a été remplacée dans un premier temps par l'approche de la contrainte structurelle reposant sur le critère de Dang-Van (voir article [5]).

En parallèle des études de sensibilité ont été effectuées. Les plus significatives sont présentées ci-dessous et correspondent aux calculs :

- avec le coefficient hydrodynamique  $C_m$  réduit (voir section 6.2),
- modélisant une taille de pied de cordon plus réaliste (voir Figure 13, où la taille du pied de cordon paraît plus proche de  $3t/4$  que de  $t/4$ , valeur de l'AWS D1.1).

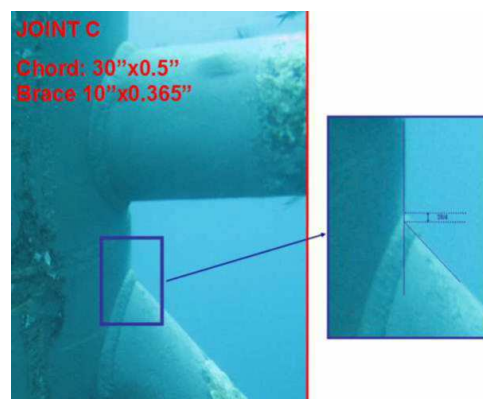


Figure 14: Inspection visuelle du nœud de référence

D'abord pour le modèle de référence, les résultats sont comparables à la méthode du point chaud. Les études de sensibilité avec la méthode de la contrainte structurelle sont résumées dans la table 11 ; elles montrent que c'est la description du chargement hydrodynamique qui présente le plus grand facteur d'amélioration pour ce cas au Gabon, où l'on observe beaucoup de petites houles de fatigue dont le coefficient  $C_m=2$  présente la principale source de conservatisme.

## 7. CONCLUSION

L'expérience de TOTAL et BUREAU VERITAS sur les structures fixes existantes montre le besoin:

- d'une approche pragmatique, car l'extension de durée vie est un processus multidisciplinaire qui implique les experts d'inspections sous-marines, les spécialistes de calculs de structures, les analystes météo-océanique / bio-salissures, etc. qui tous doivent se comprendre.
- d'une bonne gestion des données qui est la première étape pour assurer l'intégrité / fiabilité de ces structures. À titre d'exemple, la question de la bio-salissures marine nécessite des mesures détaillées et répétées pour prédire son évolution / nettoyage.
- d'un calcul en fatigue maîtrisé notamment lors de l'emploi de méthodes probabilistes (ou spectrales) qui passent par des linéarisations implicites.

Enfin les améliorations qui pourraient être envisagées résident essentiellement au niveau hydrodynamique en exploitant les résultats des instrumentations de plates-formes réalisées par certains opérateurs pour les conditions de fatigue

Table 11. Amélioration du dommage au nœud de référence

Modélisations pour l'étude de sensibilité	Facteur d'amélioration
- Modèle de référence	1
- Modèle de référence avec $C_m=1.6$	2
avec $C_m=1.2$	5
- Modèle de référence avec les cordons à 3t/4	2

Note : le gain apporté par la taille des cordons de soudures est lié à la plate-forme étudiée et n'est donc pas nécessairement généralisable.

## 8. REFERENCES

- [1] ISO 19902:2007(E), Petroleum and natural gas industries – Fixed steel offshore structures, first edition, 2007.
- [2] J. Buitrago et al., – Local Joint Flexibility of Tubular Joint – OMAE – Volume I, Offshore Technology, 1993
- [3] P. A. Kanter, I. Scherf et al. – Instrumentation of Ekofisk Platforms, OTC 13193 – Houston, USA, 2001
- [4] M. Boukinda, M. Birades et al., – Marine Growth Colonisation Process and Profile in Guinea Gulf: From Inspection Data to Load Computing – OMAE 67194 – Halkidiki, Grèce, 2005
- [5] F. Conti, L. Verney and A. Bignonnet – Fatigue Assessment of Tubular Welded Connections with the Structural Stress Approach – Fatigue Design 2009 – Senlis, France, 2009
- [6] M. Birades and L. Verney – Fatigue Analysis, Lifetime Extension and Inspection Plans – OSRC 2016 – Stavanger, Norvège, 2016
- [7] Programme d'essais communautaires CECA – Fatigue des structures marines soudées en acier. Volume I à IV