

# Dynamique des tubes parcourus à grandes vitesses et prévision de leur fiabilité

O. Safont<sup>a,b</sup>, L. Fouche<sup>a</sup>, A. Langlet<sup>b</sup>

a. Nexter Systems, 7 route de Guerry, 18000 BOURGES

b. Laboratoire PRISME, 63 avenue de Lattre de Tassigny, 18020 BOURGES Cedex

## Résumé :

*Dans un tube d'arme, un projectile génère des sollicitations dynamiques influençant la "durée de vie" du système, laquelle est définie à partir de critères d'endommagement. La présentation concerne l'identification des contraintes les plus significatives (accompagnant le projectile en mouvement) grâce à un modèle tridimensionnel validé (tube et projectile) élaboré pour l'étude. Le calcul d'endommagement, réalisé grâce à un code existant, décrit l'effet cumulatif des sollicitations dynamiques et permet de calculer la « durée de vie » des tubes.*

## Abstract :

*In a gun tube, the ammunition creates dynamics stresses, which can impact the life of the system. The article deals with the identification of the most important stresses by means of a 3D finite element model. The time history of these stresses are used by a factory made code which estimates the cumulative effects of stresses and deduces the life-time of gun tubes.*

**Mots clés : interaction tube/projectile, réponse transitoire, gonflement, durée de vie, dynamique.**

## 1 Introduction

Actuellement, la conception des tubes d'armes se fait essentiellement sur la base de la statique. Le tube est dimensionné comme s'il devait supporter une pression constante en chaque section du tube. Le critère de résistance du tube est la pression balistique nécessaire au déplacement de la munition. La bonne tenue du tube est ensuite vérifiée pour cette pression affectée des coefficients de sécurité (définis par la norme STANAG 4110). Cette méthode de calcul est évidemment limitée, car elle ne prend pas en compte les effets dynamiques. Par exemple : le forçement dû à la ceinture du projectile, le ballotement de la munition ou la température très élevée des gaz de propulsion.

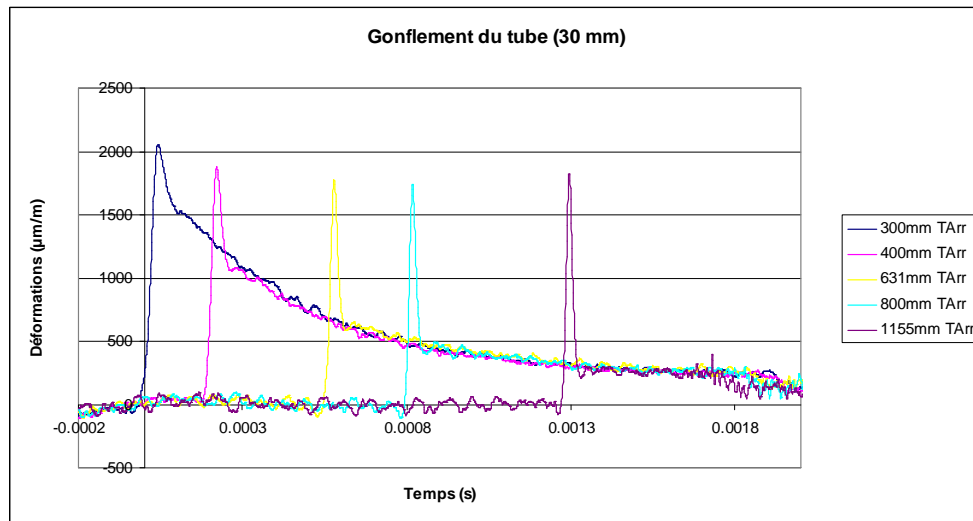
L'article se compose comme suit : 1/ résultats expérimentaux qui mettent en évidence ces effets dynamiques ; 2/ la présentation du modèle aux éléments finis construit avec le code commercial LS-Dyna ; 3/ application au calcul de durée de vie.

## 2 Partie expérimentale

La première partie de l'étude a consisté en la conception et la réalisation de l'expérimentation dynamique et du dépouillement des mesures. De nombreuses mesures ont été réalisées avec différentes armes de moyen calibre (25, 30 et 40 mm). Les tubes ont été instrumentés avec des jauges de déformations circonférentielles. Le but est d'observer le gonflement du tube en différentes sections du tube, afin d'observer l'évolution de la réponse.

La figure ci-dessous, présente quelques résultats typiques recueillis lors de différents tirs avec un tube de calibre 30 mm. Les signaux sont mesurés à différentes abscisses allant de la culasse ou « tranche arrière »

vers la bouche.



**FIG. 1 : Déformations circéférentielles du tube lors du tir d'une munition plein calibre (30 mm)**

Il est remarquable que, lorsque le projectile passe sous la jauge, un bref pic de déformation est mesuré. Ce pic est ensuite suivi par la déformation due à la pression des gaz.

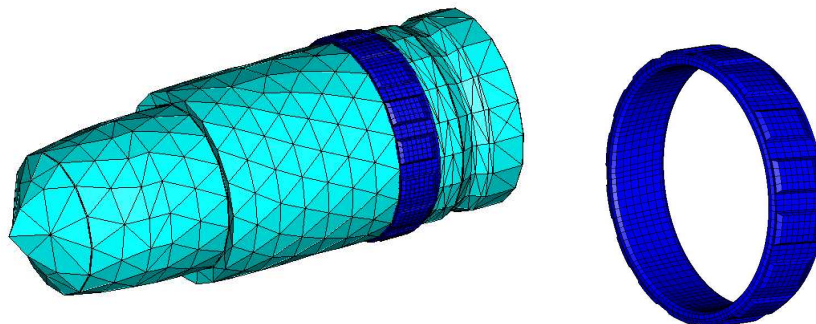
Cet essai permet de considérer l'effet du forçement de la ceinture comme prépondérant devant les effets de gonflement par les gaz et les effets inertiels.

### 3 Simulation numérique

L'approche numérique permet une étude paramétrique des contraintes subies par le tube. Puis, il est possible d'en déduire la durée de vie du tube c'est à dire le nombre de coups envisagés pour le tube avant sa détérioration. Ce modèle numérique est développé sous LS-Dyna. Il a pour but de prendre en compte de manière le plus réaliste les sollicitations du tube et doit tenir compte des points suivants : (i) architecture du projectile et de sa ceinture (joints d'étanchéité en fer fritté), (ii) géométrie du tube, (iii) des rayures internes ayant pour rôle de mettre en rotation le projectile pour le stabiliser gyroscopiquement lors de sa phase de vol, (iv) l'évolution (temps-espace) de la pression balistique.

Ainsi, le modèle utilise la géométrie exacte du tube (connue par CAO).

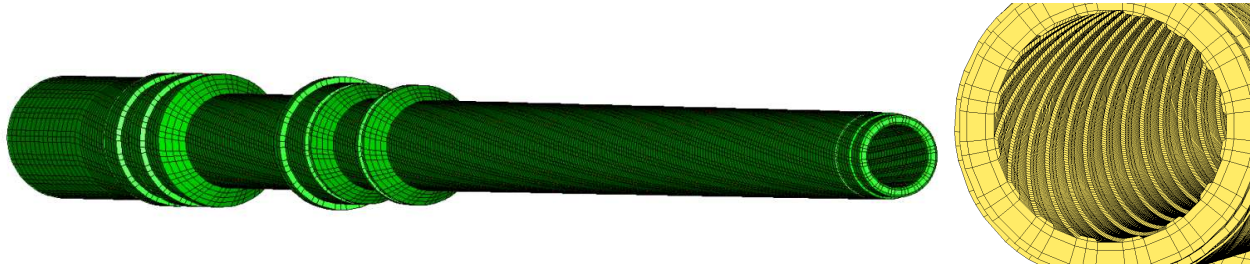
En revanche certains points ont été simplifiés. Les rayures sont maillées avec un pas constant (dans la réalité la courbure des rayures évolue pour minimiser le couple de déviation qui augmente avec la vitesse du projectile). La ceinture du projectile a été pré-rayée : en effet dans la réalité la ceinture du projectile prend l'empreinte des rayures du tube au passage du cône de forçement, lorsque le projectile s'engouffre dans le tube. Enfin, l'obus est considéré comme un corps rigide.



**FIG. 2 : Maillage de la munition (à gauche) et de la ceinture du projectile (à droite)**

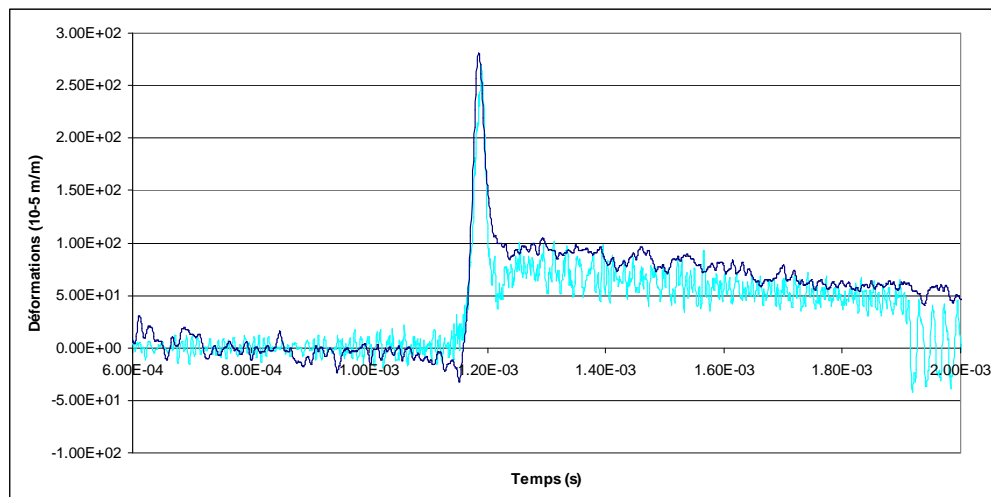
Les éléments utilisés pour le maillage sont des éléments parallélépipédiques (figure 3) affectés des propriétés

matériaux. Le tube est en acier et la ceinture de la munition en fer fritté.



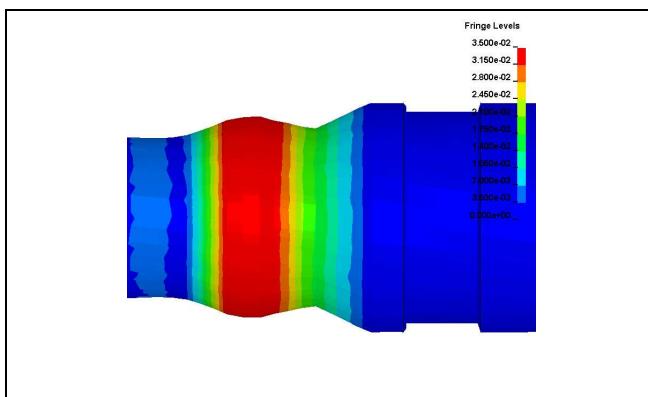
**FIG. 3 : Maillages du tube (sous « Ideas ») et vue des rayures intérieures depuis la bouche du tube.**

Le mouvement de la munition est piloté par la pression qui s'exerce sur son culot. Cette pression est connue (par un calcul annexe de balistique intérieure). La munition suit le profil du tube en établissant un contact entre les rayures du tube et la ceinture (le contact est contrôlé par la méthode des pénalités). Le calcul est un calcul explicite. Le modèle numérique a été validé pour la configuration expérimentale étudiée. Par exemple, on montre figure 4 que les déformations circonférentielles sont très bien corrélées et en particulier le pic de déformations (les déformations mesurées lors de l'essai et les déformations calculées sont représentées respectivement en bleu foncé et en turquoise).

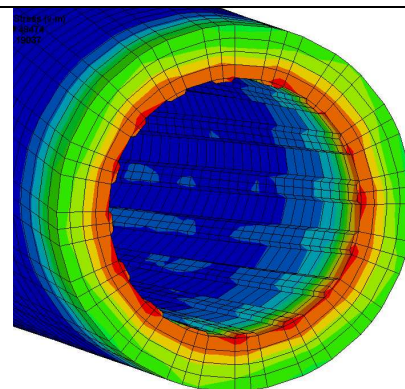


**FIG. 4 : Comparaison déformations mesurées et calculées**

La figure 5 représente la déformation transitoire du tube au passage du projectile, (présentant une combinaison de flexion, de torsion, et de gonflement).



**FIG. 5 : Gonflement du tube  
au passage de la munition**



**FIG. 6 : Visualisation des contraintes dans l'épaisseur  
du tube**

Les contraintes sont maximales à l'intérieur du tube (cf. figure 6). Vers l'arrière du tube, les contraintes dépassent la limite élastique du tube. Il y a une plastification localisée de la paroi interne du tube qui influencera le calcul de durée de vie du tube.

#### 4 Calcul du cumul de déformations

Un calcul a été réalisé afin d'analyser la plastification induite par le passage successif de plusieurs munitions. L'état initial du tube est donné par l'état final de la simulation précédente. Les résultats suivants présentent l'évolution de la plastification du tube au fur et à mesure du passage des munitions suivies de la pression des gaz.

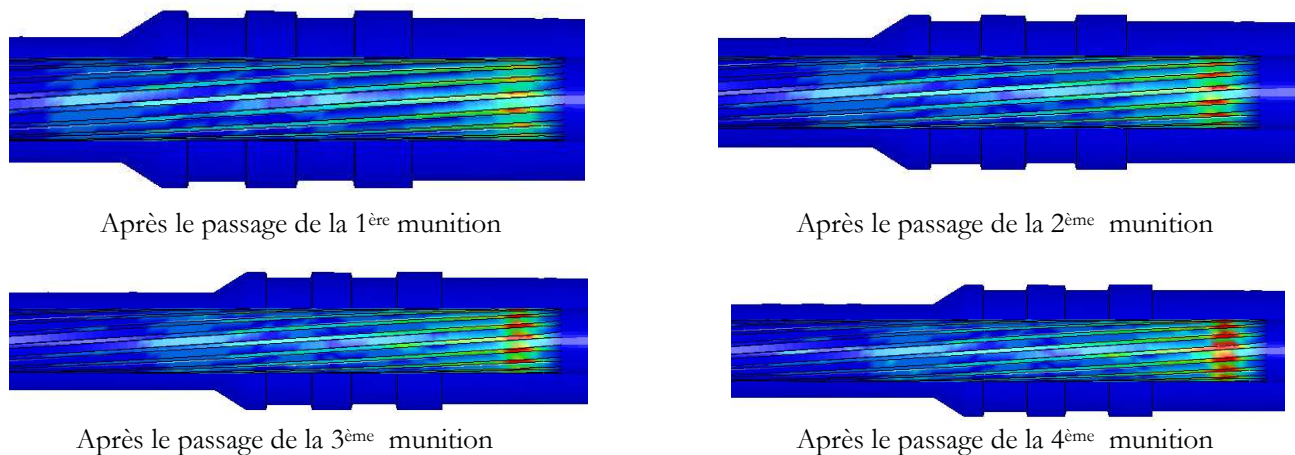


FIG. 7 : Visualisation des déformations plastiques résiduelles en fonction du passage des munitions

La zone rouge indique la présence de déformations plastiques résiduelles supérieures à 1%, on note également l'extension de la zone de plastification après quatre tirs simulés.

La figure 8 présente l'accumulation de la déformation plastique en fonction du temps pour un élément du maillage situé dans la zone de plastification.

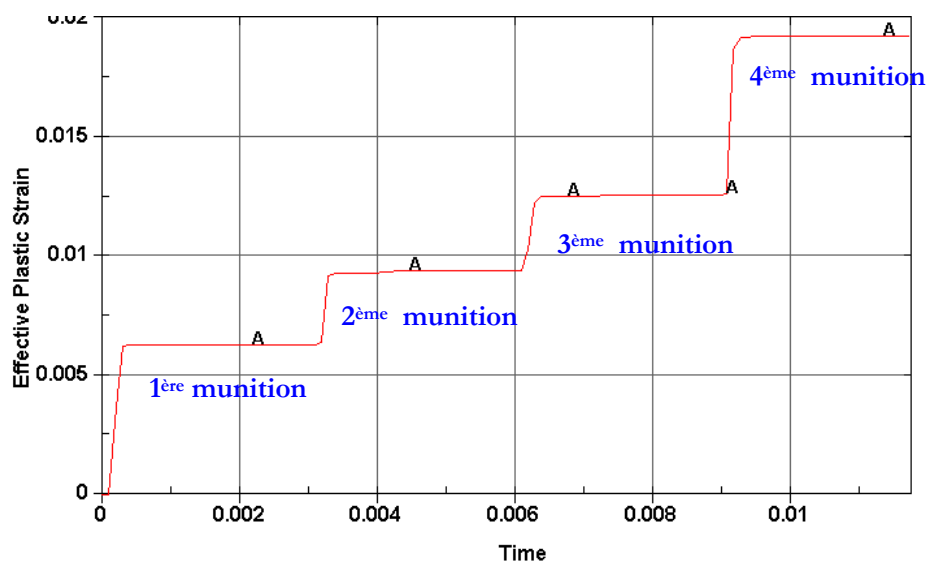


FIG. 8 : Evolution des déformations plastiques en fonction du temps

## 5 Calcul de durée de vie [2]

Les sollicitations dynamiques produites lors des tirs provoquent des contraintes répétées sur la structure, susceptibles d'entraîner des fissures de fatigue. Le pic de contrainte associé au pic de déformation circonférentielle est apparu comme majorant. Le calcul qui suit va permettre de quantifier l'influence de cette sollicitation de courte durée sur la durée de vie des tubes. Les fissurations par fatigue se localisent systématiquement dans des détails structuraux qui induisent des concentrations de contraintes : ici les fonds de rayures.

Le calcul se fait suivant une approche locale, c'est à dire que l'on s'intéresse aux zones soumises aux concentrations de contraintes. Le champ spatio-temporel des contraintes est issu du modèle décrit au §3. Dans notre cas, le tube est modélisé avec ses singularités géométriques.

Les contraintes dynamiques peuvent atteindre des pics dépassant la limite d'élasticité du matériau. La plastification qui en résulte écrête les amplitudes de contraintes, et décale les cycles suivants vers un niveau moyen de contraintes non nul. De ce fait la plastification modifie la cinétique d'endommagement. Le modèle élastoplastique utilisé correspond au modèle d'écrouissage cinématique et isotrope non linéaire de Chaboche. Le critère de fatigue utilisé est un critère de Dang – Van [3] (**critère en contrainte à facette**). Sur chaque facette susceptible de s'endommager un comptage Rainflow [4] effectué sur la contrainte de cisaillement permet d'extraire les cycles. Pour chaque cycle extrait, le critère est construit par combinaison d'amplitude du cisaillement et du maximum de la contrainte hydrostatique rencontré pendant le cycle. L'endommagement de la facette, associé à chaque cycle extrait, est calculé sur la base de la loi de Miner à partir de la courbe de résistance à la fatigue du matériau exprimée sous forme de loi de Basquin, puis sommé sur l'ensemble des cycles extraits sur la durée du temporel. La durée de vie est calculée en maximisant l'endommagement sur l'ensemble des facettes.

L'endommagement est calculé à partir du tenseur des contraintes, correspondant à celui obtenu par le calcul dynamique.

Les fissures de fatigue apparaissent d'abord toujours en surface intérieure. Sur cette surface, on calcule par projection le tenseur des contraintes 2D au point  $M$  :

$$\sigma(M, t) = \begin{bmatrix} \sigma_{11}(M, t) & \sigma_{12}(M, t) \\ & \sigma_{22}(M, t) \end{bmatrix}.$$

Les premiers résultats obtenus dans le cadre de cette étude montrent que si l'on tient compte des effets dynamiques la durée de vie prévue selon le critère choisi plus haut est 100 fois inférieure à celle prévue par le calcul classique (rappelé dans [1]).

## 6 Conclusion

L'approche expérimentale a permis d'identifier les contraintes les plus significatives occasionnées par le tir d'un projectile. Il s'agit de la pression exercée par la ceinture au passage de la munition. Malgré son importance, cet effet a été peu étudié.

Le calcul dynamique couplé à celui de l'endommagement remet en cause la méthode de dimensionnement actuel des tubes d'arme en terme de durée de vie.

Le travail présenté est une contribution importante à la prévision de la fiabilité des tubes d'armes.

## Références

- [1] T.D Andrews, 2006, "Projectile Driving Band Interactions With Gun Barrels", Journal of Pressure Vessel Technology, May 2006, Vol.128, p.273-278).
- [2] E. Petitpas, "Outils et approches de conception avancée : évaluation de l'amorçage de fissures en fatigue", Fatigue Design, 2005.
- [3] BANNANTINE J.A. and SOCIE D.F., Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques, pp. 249-275. ASTM STP 112, ASTM, Philadelphia, 1992.
- [4] Fatigue sous sollicitations d'amplitude variable ; méthode Rainflow de comptage de cycle. NF A 03-406 AFNOR 1993.