

# Comportement de parois en bardage métallique sous sollicitation d'explosion : expériences et modélisation

G. Prod'homme<sup>a</sup>

a. INERIS, Parc Technologique Alata 60550 Verneuil en Halatte

[gaetan.prodhomme@ineris.fr](mailto:gaetan.prodhomme@ineris.fr)

## Résumé :

*L'INERIS s'est intéressé au comportement des parois métalliques face aux effets de surpression. Le développement de modèles représentatifs du comportement de parois métalliques face aux effets de surpression se heurtait à une base de validation, issue des données du retour d'expérience, trop limitée. Afin d'améliorer la connaissance de la réponse de ces structures, l'INERIS a mené une campagne expérimentale sur des bardages métalliques nervurés soumis à une explosion externe. Cet article a pour objectif de mettre en avant l'exploitation des résultats obtenus lors de cette campagne d'essais dans la mise au point et la validation de modèles mécaniques analytiques et numériques. Une série de neuf essais à moyenne échelle a été menée dans une galerie de la plateforme Explosion-Structure de l'INERIS sur divers ensembles constitués de bardages, lisses et fixations soumis aux effets d'ondes de souffle. L'amplitude et la durée de la phase positive des ondes de surpression, issues de détonation, égale à plusieurs dizaines de ms, est représentative de situations industrielles. Les résultats d'essais ont permis de conforter les connaissances sur les ruptures des fixations et de mettre en avant des modes de rupture privilégiés. Un modèle analytique a été mis au point et des modèles numériques ont été mis en œuvre.*

## Abstract :

*INERIS has been interested in the behavior of the corrugated metal panels to overpressure from accidental explosion. The development of models representative of the behavior of corrugated walls to overpressure was confronted with a lack of validation, resulting from the limited experimental data. In order to improve knowledge on these structures, INERIS conducted an experimental campaign on corrugated metal panels subjected to an external explosion. The objective of this article is to highlight the results obtained during this campaign on the development and validation of analytical and numerical mechanical models. A series of nine medium-scale tests were conducted on the INERIS explosion-structure platform on various sets of panels, boundaries and fixings subjected to various shock waves. The amplitude and duration of the positive phase of the shock waves, resulting from detonation, equal to several tens of milliseconds, is representative of industrial cases. The results of the tests helped to reinforce the knowledge about the fracture modes. An analytical model has been developed and numerical models have been implemented.*

**Mots clefs : bardage métallique, explosion, essais, SDOF, analyse numérique**

# 1 Introduction

Dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Technologiques et des études de dangers dans les installations classées pour la protection de l'environnement, l'INERIS s'est intéressé au comportement des parois métalliques face aux effets de surpression. Lors d'une explosion accidentelle survenant sur un site industriel à risques, les parois en bardage métallique constitutives de nombreuses structures sont des éléments importants. Elles peuvent ainsi soit apporter une protection aux personnes dans les bâtiments soumis aux effets de surpression externe, soit, comme dans l'industrie de stockage agro-alimentaire, permettre d'éviter la propagation d'explosions. Toutefois, comme le montrent les dégâts de récents accidents industriels, les bardages peuvent également être une source de suraccident. C'est le cas lorsqu'ils restent en place sur une structure non dimensionnée pour reprendre l'ensemble des efforts dus à l'onde de souffle, ou, à l'inverse, lorsqu'ils sont arrachés ou trop déformés et qu'ils ne peuvent plus empêcher la propagation d'une explosion. Le développement de modèles représentatifs du comportement de parois métalliques face aux effets de surpression se heurtait à une base de validation, issue des données du retour d'expérience, trop limitée. Afin d'améliorer la connaissance de la réponse de ces structures, l'INERIS a mené une campagne expérimentale sur des bardages métalliques nervurés soumis à une explosion externe. Cet article a pour objectif de mettre en avant l'exploitation des résultats obtenus lors de cette campagne d'essais dans la mise au point et la validation de modèles mécaniques analytiques et numériques. Une série de neuf essais à moyenne échelle a été menée dans une galerie de la plateforme Explosion-Structure de l'INERIS sur divers ensembles constitués de bardages, lisses et fixations soumis aux effets d'ondes de souffle. Des modélisations ont ensuite été mise en œuvre pour évaluer la pertinence des différents modèles et critères généralement utilisées en analyse du comportement à l'explosion.

L'objectif de cette étude est de vérifier et d'améliorer les hypothèses de calcul et modèles mécaniques permettant de caractériser la tenue des bardages et de leur support lorsque la sollicitation est un signal d'onde de choc externe. Les conditions expérimentales et les résultats des essais sont présentés dans les chapitres suivants puis les modèles mis en œuvre sont précisés. La comparaison entre les essais et les modèles est ensuite présentée puis les principales conclusions sont données.

## 2 Expériences

### 2.1 Protocole expérimental

L'objectif de cette étude est de vérifier et d'améliorer les hypothèses de calcul et modèles mécaniques permettant de caractériser la tenue des bardages et de leur support lorsque la sollicitation est un signal d'onde de choc externe. L'assemblage testé est constitué par une structure porteuse supposée fixe sur laquelle sont fixées les lisses d'appui du bardage. Le bardage est ensuite vissé sur les lisses. Des IPE 200 et UPE200 constituent la structure support.

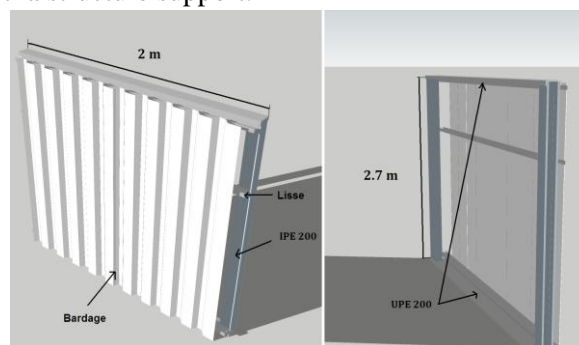


Figure 1 : principe du banc

Le bardage est l'élément principal constitutif des parois métalliques. Dans le cadre de notre étude, le bardage sélectionné est un bardage simple peau de type 915.40.5 d'une épaisseur de 0,75 mm en acier galvanisé S320 GD. Les caractéristiques géométriques du bardage sont présentées sur la figure suivante. Les panneaux réceptionnés ont une longueur de 2,70 m et une largeur utile de 0,915 m. Dans le cadre de cette campagne d'essai, on retient un profilé de type  $\Sigma$  140 d'épaisseur de tôle 1,5 mm dont les dimensions sont données ci-dessous. Ces profilés sont formés à froid en acier S280. La structure de support est fixée dans la roche et contreventée. On fixe les lisses sur la structure par deux tiges filetées boulonnées à chaque extrémité de façon à rigidifier au maximum la liaison lisse-structure porteuse tel qu'illustré ci-dessous.



Figure 2 : fixation des lisses sur la structure support / configurations d'appuis n°1 et 2

Deux configurations d'appuis sur les lisses sont considérées pour les essais. La première configuration est constituée de deux lisses supports de fixation espacées de 2 m et d'une lisse complémentaire non déformable en appui sur l'UPE en partie haute. La seconde configuration est constituée de trois lisses supports de fixations espacées de 1 m 30. Le bardage est vissé sur les trois lisses. Pour les essais, le mode de fixation est une pose directe par vis auto-taraudeuse positionné en creux d'onde.

Pour cette campagne, les sollicitations ont été limitées à des signaux d'ondes de choc. L'onde de choc est produite par la détonation d'une charge explosive placée au fond de la galerie d'essai. L'intensité de l'onde de surpression que l'on souhaite générer est fonction de la quantité d'explosif mise en jeu. Les charges retenues pour cette campagne permettent de produire des ondes de choc d'intensité incidente pouvant varier de 20 à 200 mbar environ.

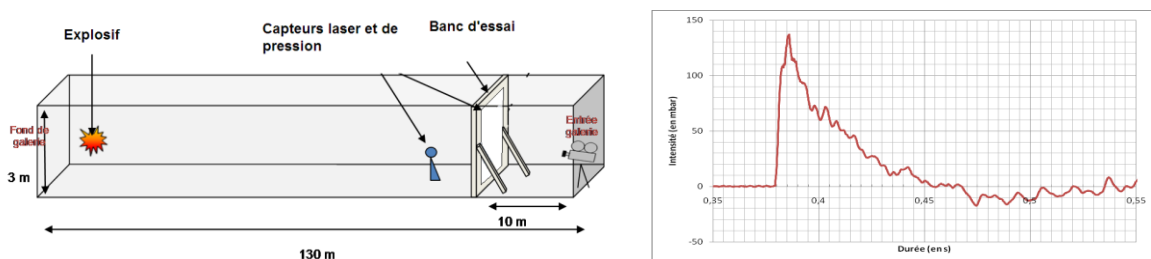


Figure 3 : principe général du dispositif en galerie poussière / Profil d'onde générée

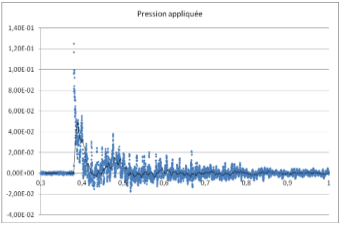
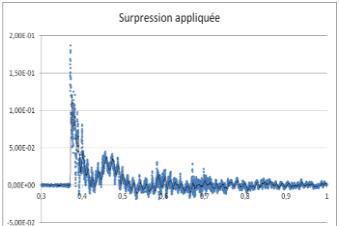
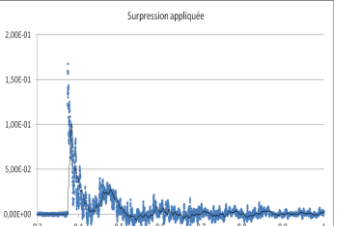
L'instrumentation destinée à mesurer la sollicitation comprend 3 capteurs de pression, un capteur placé à l'intérieur de la galerie permettant de mesurer l'onde de surpression incidente, un capteur placé sur le support du corps d'épreuve pour mesurer la pression réfléchiée de l'onde de souffle sur le bardage et un capteur placé sur le support du corps d'épreuve mesurant l'onde de surpression s'appliquant en face arrière du bardage.

Pour mesurer directement un déplacement, le choix est porté sur un appareil de mesure laser à haute fréquence d'échantillonnage positionné au centre du bardage. Afin de mesurer les accélérations, les

deux accéléromètres monodirectionnels sont positionnés sur le bardage. Les déformations sont mesurées sur les lisses et sur le bardage par le biais de jauges de grandes déformations. A cela s'ajoute un enregistrement des essais par une caméra à enregistrement rapide en face arrière des bardages et deux caméras classiques au-dessus et en face avant des bardages.

## 2.2 Résultats expérimentaux

Une série de neuf essais à moyenne échelle a été menée dans une galerie de la plateforme Explosion-Structure de l'INERIS sur divers ensembles constitués de bardages, lisses et fixations soumis aux effets d'ondes de souffle. Le tableau ci-dessous résume la série d'essais réalisée en fonction des configurations d'appui, des signaux de surpression, des configurations de fixation. Les résultats sont synthétisés dans la dernière colonne.

N° d'essai	Configuration d'appui	Signal de surpression appliqué <sup>1</sup> (bar et s)	Configuration de vis	Principales observations
1	1 (2 lisses espacées de 2 m)		1 (12 vis)	Tenue des fixations Déformation principalement élastique du bardage et première plastification au centre
2				Tenue des fixations Déformation plastique du bardage au centre et aux appuis Déformation des lisses en flexion et torsion
3	1 (2 lisses espacées de 2 m)		1 (12 vis)	Tenue des fixations Déformation plastique du bardage au centre et aux appuis Déformation forte des lisses en flexion et torsion
4			2 (6 vis)	Tenue des fixations Déformation plastique du bardage et décollement des appuis entre les fixations Déformation faible des lisses en flexion et torsion
5			2 (6 vis)	Rupture au niveau des fixations aux deux appuis et projection du bardage
6			4 (10 vis)	Rupture au niveau des fixations de la lisse basse

<sup>1</sup> Le signal présenté est la résultante d'une pression interne moins une pression externe

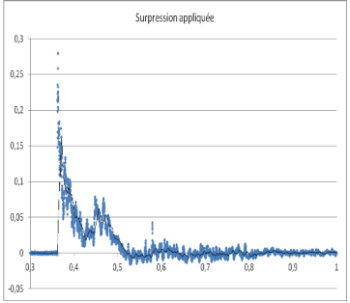
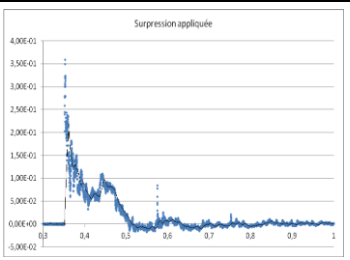
N° d'essai	Configuration d'appui	Signal de surpression appliqué <sup>1</sup> (bar et s)	Configuration de vis	Principales observations
7			3 (20 vis)	Tenue des fixations Déformation très importante du bardage et des lisses ainsi que des appuis des lisses
8	2 (3 lisses espacés de 1 m 30)		3 (30 vis)	Tenue des fixations Légère déformation plastique du bardage et des lisses inférieure et supérieure Forte déformation en flexion de la lisse centrale
9			3 (30 vis)	Tenue des fixations Forte déformation plastique du bardage et des lisses inférieure et supérieure Très forte déformation en flexion de la lisse centrale et de ses appuis

Tableau 1 : synthèse des résultats d'essais

### 3 Modélisation

#### 3.1 Modèles analytiques

Dans un premier temps, les modèles mécaniques simples de bardage sont présentés. Les résultats des différents modèles sont comparés aux résultats des essais et les conclusions sur les modèles sont données. La méthode SDOF (Single Degree Of Freedom) ou Méthode à un degré de liberté est une méthode de calcul dynamique linéaire ou non linéaire applicable si l'on peut assimiler un élément de structure à un système à un degré de liberté équivalent. Cette méthode est celle développée par Biggs en 1964 [1] et perfectionnée par de nombreux auteurs et notamment l'armée américaine de 1968 à 2008 [2]. Elle s'applique à des structures pouvant être décomposées en éléments simples (poutres, poteaux, plaques, dalles, etc.) et pour lesquels on peut considérer que la réponse dynamique individuelle peut être découplée du reste de la structure.

Elle consiste à modéliser l'élément de structure étudié en un système équivalent masse-ressort à un degré de liberté, comme représentée Figure 4.

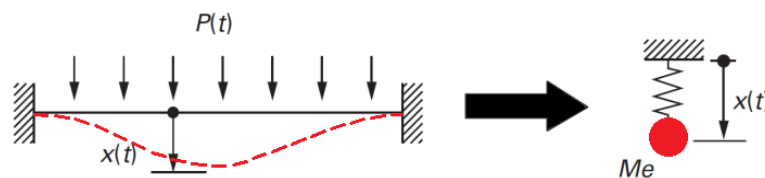


Figure 4 : principe général du modèle SDOF

Plusieurs modèles ont été mis en œuvre pour modéliser les essais sur les bardages. En particulier, trois modes de comportement de poutres équivalentes ont été comparés aux essais :

- un mode de comportement des bardages en flexion simple élastique linéaire [1];
- un mode de comportement en flexion simple élasto-plastique multi-linéaire [2] ;
- un mode de comportement en flexion et tension de membrane élasto-plastique multilinéaire [3].

Pour chacun de ces modes des critères de rupture généraux (en déplacement) et locaux (efforts aux appuis et fixations) ont été retenus. En conclusion des comparaisons, l'exploitation des essais a permis de démontrer une surestimation forte des déplacements et de la rupture pour le modèle SDOF linéaire et multilinéaire en flexion simple avec des critères globaux (déplacement et angle de rotation). L'exploitation des modèles montre également une meilleure précision de la part des modèles SDOF intégrant la tension de membrane dans le calcul de la réponse. L'utilisation de modèles de rupture de fixation pour des critères locaux de rupture montre un certain conservatisme.

Ces résultats sont en grande partie expliqués par l'absence de dissipation d'énergie plastique pour le modèle linéaire et les modèles de rupture de fixation ainsi que l'absence de considération de la déformation des appuis pour le modèle non-linéaire sans tension de membrane. Les résultats ont également permis d'identifier plusieurs besoins pour l'amélioration des modèles :

- le besoin de préciser le seuil d'effort membranaire capable de se développer dans le bardage notamment en fonction de la rigidité entre les appuis et le bardage, sous peine de résultats en déplacement non conservatifs ;
- le besoin de fixer des critères de rupture sur la base de la tenue des fixations et du comportement plastique du bardage au niveau des fixations.

In fine, un modèle incluant le comportement des lisses et un critère affiner de rupture des fixations permet de réduire les marges conservatives de la modélisation analytique et peut être utilisé pour réaliser des abaques de résistance.

### 3.2 Modèles numériques

Une modélisation par éléments finis du dispositif est réalisée sous ANSYS Autodyn [4]. Il s'agit d'un solveur de dynamique explicite. Il permet notamment de réaliser des calculs mécaniques fortement non linéaires permettant d'obtenir des résultats tels que la déformation de bardages sous des sollicitations de surpression. La modélisation est surfacique et l'ensemble des éléments utilisés sont des éléments de type coque. Une symétrie de plan est imposée au centre du bardage.

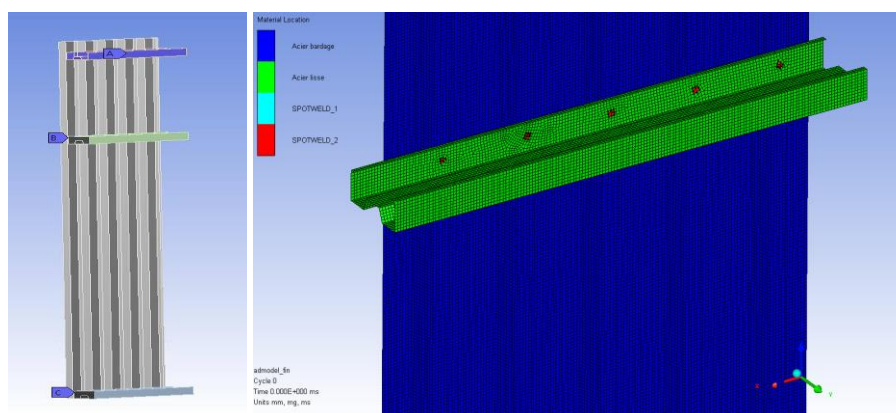


Figure 5 : géométrie modélisée et zoom sur le maillage d'une lisse

Le modèle matériau est le modèle de Johnson Cook intégrant un modèle d'écroutissement complet dépendant de la vitesse de déformation [5]. Afin de modéliser la résistance des fixations entre le

bardage et les lisses, les « points de soudure » d'autodyn sont utilisés. Il s'agit d'un ensemble d'éléments à 1 dimensions reliant deux surfaces (éléments coques ou faces d'un élément solide) comme illustré Figure 31. Ces éléments sont rigides et possèdent un critère de rupture en force normale et en force de cisaillement aux deux nœuds ainsi reliés.

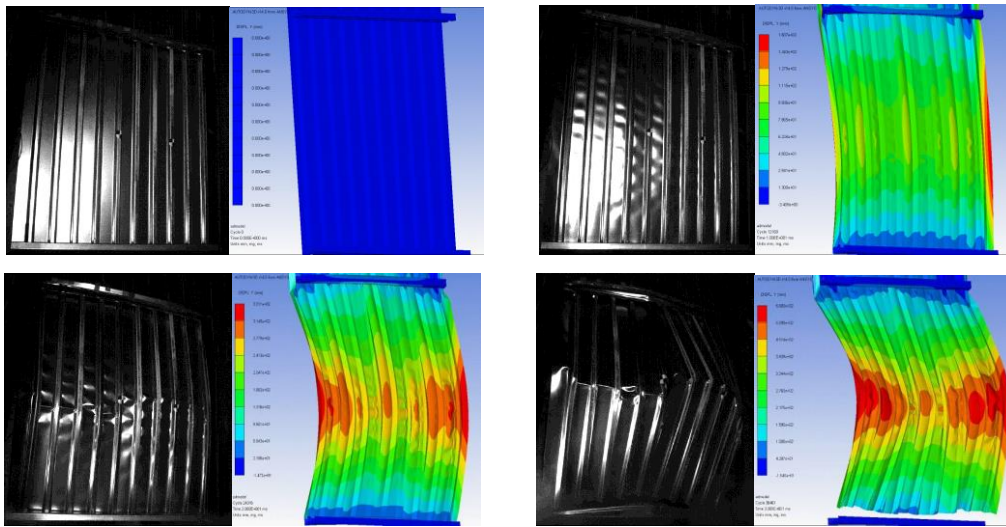


Figure 6 : illustration de la déformée de l'essai 5 (caméra rapide et simulation)

Le modèle de comportement bardage et lisse donne des résultats satisfaisant en termes de déplacement vis à vis des essais avec des erreurs inférieures à 20% sur la flèche maximale. Les comparaisons détaillées amènent également aux conclusions suivantes :

- les déformations mesurées par les extensomètres et les résultats numériques sont d'un ordre de grandeur similaire.
- Les taux de déformation au centre du bardage et de la lisse sont également similaires ;
- Le taux de déformation à l'encastrement de la lisse est plus important en numérique que pour l'essai ;
- Les résultats numériques montrent une déformation prématurée par rapport aux résultats expérimentaux.

Ces résultats confirment la qualité du modèle numérique tout en illustrant le défaut de conditions aux limites ou à l'interaction bardage-lisse qui entraîne un taux de déformation plus important aux appuis et donc une réponse plus rapide de l'ensemble de la structure. Du point de vue des critères de rupture, la modélisation numérique des efforts admissibles aux fixations donne des valeurs d'effort de 1.5 à 1.75 fois la valeur d'effort théorique pour satisfaire l'ensemble des situations d'essai. Ces coefficients sont cohérents avec les paramètres physiques pouvant entrer en jeu (coefficient de sécurité, amplification dynamique et plastification locale).

## 4 Conclusions

Une série de neuf essais à moyenne échelle a été menée dans une galerie de la plateforme Explosion-Structure de l'INERIS sur divers ensembles constitués de bardages, lisses et fixations soumis aux effets d'ondes de souffle. La durée de la phase positive des ondes de surpression, issues de détonation, égale à plusieurs dizaines de ms, est représentative d'explosions industrielles. Les résultats d'essais ont permis de conforter les connaissances sur les ruptures des fixations et de mettre en avant des modes de rupture privilégiés. Ils ont par ailleurs permis de mettre en avant, certes un comportement des lisses en flexion, mais également en torsion aux extrémités du bardage. Les seuils de rupture des fixations habituellement retenus dans le cadre des modélisations ont pu voir leurs ordres de grandeur confirmés au travers de l'analyse. Ainsi, des facteurs d'amplification des efforts admissibles aux

fixations ont pu être déterminés et validés pour l'ensemble des configurations d'essai. Les mesures de déplacements et de déformations réalisées sur le bardage pendant les essais ont pu être utilisés pour comparer les résultats des modèles analytiques et numériques. Un modèle analytique intégrant l'effet de membrane et le comportement des appuis a été mis au point et des modèles numériques intégrant des lois de comportement dynamique des matériaux et le comportement des fixations ont été mis en œuvre. Les résultats ont permis de faire évoluer les pratiques de l'INERIS pour la modélisation des ensemble bardage-lisse.

## Références

- [1] Biggs, John M.. "Introduction to Structural Dynamics.", Editions McGraw-Hill, 1964.
- [2] Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Unified Facilities Criteria, US Department of Defence, UFC 3-340-02 (TM 5-1300, NAVFAC P-397, AFR 88-22), 2008.
- [3] Simplified methods for analysis of response to dynamic loadings, FABIG Technical Note 7, 2002
- [4] Autodyn – Explicit software for Non Linear Dynamics-Theory Manual, Revision 4.3, Century Dynamics, 2005
- [5] Johnson, G.R.; Cook, W.H. (1983), "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high", Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics: 541–547, retrieved 2009-05-13