

**ACADEMIE MILITAIRE  
FONDOUK JEDID**

DIRECTION DE L'ENSEIGNEMENT  
UNIVERSITAIRE

**Département :**

GC	x	Prépa	
EM		SJG	
TEL		LASM	
GI		MPSM	
TA			

Approbation par : Le Directeur de l'Enseignement Universitaire ou le Directeur du département concerné

Nom et prénom : .....

Date et heure : .....

Signature et Cachet



**Année Universitaire :2025-2026**

**Examen**

**Module :** Calcul des structures sous l'effet des explosions

**Classe :** GC31

**Date :** 12/12/2025

**Enseignant(e) :** Lt Col Oussama Atoui

**Durée :** 2H

**Documents autorisés :** Feuille A4 (RV)

**Nombre de pages :** 8

**Barème :** (9 + 7 + 4)

Référence : ENQ-REF-24 Ver:01, Date :08-09-2023

**Partie 01 : Questions à choix multiple (09 pts = 0,5 pt par question)**

*La première partie de l'examen est conçue pour évaluer votre compréhension des phénomènes physiques et des concepts fondamentaux abordés dans le module « Calcul des structures sous l'effet des explosions ». Vous devez lire **attentivement** chaque question et choisir la réponse qui correspond le mieux. Pour répondre, complétez le tableau suivant (**sur votre feuille de réponses**) en inscrivant uniquement la lettre correspondant à la bonne réponse. Veuillez noter qu'il n'y a qu'une **seule** réponse correcte par question. Faites preuve de vigilance, en particulier face aux questions **pièges**.*

1	
2	
3	
4	
5	
6	

7	
8	
9	
10	
11	
12	

13	
14	
15	
16	
17	
18	

**Question 1 :**

Quelle est la principale différence entre une déflagration et une détonation dans le cadre des explosions chimiques ?

- a) La déflagration se propage à une vitesse subsonique, tandis que la détonation se propage à une vitesse supersonique.
- b) La déflagration nécessite un front de choc, tandis que la détonation ne le nécessite pas.
- c) La déflagration est caractérisée par un auto-échauffement, tandis que la détonation est basée sur un transfert de chaleur.
- d) La déflagration concerne uniquement les explosifs brisants, tandis que la détonation concerne uniquement les poudres militaires.

**Question 2 :**

Qu'est-ce qui distingue principalement un explosif primaire d'un explosif secondaire ?

- a) Les explosifs primaires nécessitent une initiation par des explosifs secondaires.
- b) Les explosifs primaires sont plus sensibles et détonent plus facilement que les explosifs secondaires.
- c) Les explosifs secondaires détonent spontanément à température ambiante, contrairement aux explosifs primaires.
- d) Les explosifs primaires sont utilisés uniquement dans des applications militaires, contrairement aux explosifs secondaires.

### **Question 3 :**

Quel mécanisme explique la formation d'un front de choc à partir d'une onde de pression initiale lors d'une explosion ?

- a) La propagation uniforme des gaz à une vitesse constante.
- b) La superposition des fronts d'onde causée par la variation locale de la vitesse du son.
- c) L'interaction entre la phase positive et la phase négative de l'onde.
- d) L'effet des forces d'inertie, qui empêchent la propagation uniforme.

### **Question 4 :**

Parmi les affirmations suivantes concernant le phénomène de souffle et son interaction avec les structures, laquelle est correcte ?

- a) Le souffle est uniquement composé des produits de l'explosion transportés par l'onde de choc.
- b) Le souffle est un vent provoqué par le déplacement des molécules d'air suite au passage de l'onde de choc.
- c) Le souffle n'a aucun impact sur les structures de surface, quel que soit le type d'explosion.
- d) Lors de la phase de succion, le souffle continue à se propager dans le même sens que l'onde de choc.

### **Question 5 :**

Parmi les affirmations suivantes concernant l'utilisation du TNT comme référence pour les explosifs, laquelle est correcte ?

- a) Le TNT est utilisé comme référence car il est l'explosif le plus puissant disponible.
- b) L'équivalent TNT d'un explosif est déterminé uniquement en fonction de son poids.
- c) Le TNT est utilisé comme référence car ses propriétés énergétiques sont bien documentées et stables.
- d) Tous les explosifs ont le même facteur de conversion par rapport au TNT.

### **Question 6 :**

Quels sont les facteurs qui influencent directement la propagation des ondes de choc ?

- a) La température et la vitesse du vent
- b) La forme de la charge, la symétrie de la charge et la nature du terrain
- c) La forme de la charge, l'hétérogénéité du milieu transmetteur, et la nature de la source d'énergie
- d) La vitesse du vent, l'humidité relative et la végétation

### **Question 7 :**

Parmi les facteurs suivants, lequel n'influence pas de manière significative la magnitude de l'onde de choc ?

- a) La symétrie de la charge dans le cas des charges sphériques ou ponctuelles
- b) La forme de la charge dans le cas des charges cylindriques ou parallélépipédiques
- c) Les circonstances atmosphériques comme la température et l'humidité relative
- d) La masse de l'explosif utilisé, indépendamment de sa forme

### **Question 8 :**

Dans le cas d'une structure non ventilée remplie d'un mélange air-gaz stoechiométrique, quel facteur influence directement le pic de pression  $P_{max}$  ?

- a) La densité du gaz utilisé
- b) La capacité calorifique  $C_v$  du gaz

- c) L'énergie dégagée par le mélange stœchiométrique
- d) Le volume total de la structure

#### **Question 9 :**

Quelle affirmation est correcte concernant la mesure de la violence d'une explosion dans une structure non ventilée ?

- a) La violence de l'explosion est déterminée uniquement par l'énergie dégagée par le mélange stœchiométrique.
- b) Une vitesse de montée de pression  $(dp/dt)_{max}$  plus élevée indique une explosion plus lente.
- c) La violence est mesurée par le maximum de la vitesse de montée de pression  $(dp/dt)_{max}$ .
- d) Le temps de montée de la pression (rise-time) est négligeable pour caractériser la vitesse d'explosion.

#### **Question 10 :**

Quelle est la fonction principale du module piézoélectrique K dans un capteur de pression?

- a) Déterminer la force exercée sur le capteur en fonction de la charge électrique mesurée.
- b) Convertir la charge électrique en une tension proportionnelle au temps.
- c) Amplifier le signal électrique généré par le cristal.
- d) Générer une charge électrique en réponse à une force ou une pression appliquée.

#### **Question 11 :**

Quelle est la différence essentielle entre les capteurs « side-on » et « face-on » dans la mesure de pression ?

- a) Les capteurs « side-on » mesurent la pression réfléchie, tandis que les capteurs « face-on » mesurent la pression incidente.
- b) Les capteurs « side-on » mesurent l'onde de choc incidente, tandis que les capteurs « face-on » mesurent la pression réfléchie.
- c) Les capteurs « face-on » sont utilisés exclusivement pour les mesures avec des oscilloscopes.
- d) Les capteurs « side-on » intègrent une microélectronique ICP pour convertir la charge en tension, contrairement aux capteurs « face-on ».

#### **Question 12 :**

Quelle est la caractéristique principale du design d'un capteur « side-on » qui le rend adapté pour mesurer la pression en champ libre ?

- a) La membrane en invar située sur le côté pour minimiser les perturbations de l'onde.
- b) Le corps métallique en acier inoxydable permettant une fixation solide au ras de la surface.
- c) Le design en forme d'aiguille mince et allongée pour minimiser l'interférence avec la propagation de l'onde.
- d) L'utilisation d'une pièce auxiliaire pour assurer une mesure précise.

#### **Question 13 :**

Pourquoi utilise-t-on généralement une pièce auxiliaire (« interface ») avec les capteurs « face-on » ?

- a) Pour réduire les perturbations de l'onde incidente en champ libre.
- b) Pour fixer le capteur au ras de la surface et mesurer la pression réfléchie avec précision.
- c) Pour protéger la membrane en invar contre les surcharges de pression.
- d) Pour permettre des mesures à incidence oblique uniquement.

#### **Question 14 :**

Dans la méthode d'intégration temporelle directe, quelle est la différence clé entre les procédures explicites et implicites ?

- a) Les procédures explicites nécessitent des schémas de différences finies, tandis que les procédures implicites utilisent des schémas analytiques.
- b) Les procédures explicites dépendent uniquement des informations jusqu'à l'instant  $t_n$ , tandis que les procédures implicites utilisent également des informations à l'instant  $t_{n+1}$ .
- c) Les procédures explicites nécessitent un pas de temps plus grand  $\Delta t$  pour assurer la convergence, tandis que les procédures implicites fonctionnent mieux avec un  $\Delta t$  plus petit.
- d) Les procédures explicites et implicites diffèrent uniquement par leur application aux phénomènes linéaires ou non linéaires.

#### **Question 15 :**

Quel est l'avantage principal des procédures implicites par rapport aux procédures explicites dans la méthode d'intégration temporelle directe ?

- a) Elles permettent de calculer des solutions plus rapidement grâce à leur extrapolation pure.
- b) Elles sont toujours plus précises car elles ne dépendent pas du choix du pas de temps  $\Delta t$ .
- c) Elles sont plus stables pour des systèmes rigides ou des phénomènes rapides nécessitant un petit  $\Delta t$ .
- d) Elles permettent une meilleure approximation des forces externes à l'instant  $t_n$ .

#### **Question 16 :**

Dans un spectre de réponse, que représente le facteur de chargement dynamique (Dynamic Load Factor, **DLF**) ?

- a) Le rapport entre la déformation maximale et la charge dynamique appliquée.
- b) Le rapport entre la déformation dynamique maximale et la déformation statique maximale.
- c) La réponse maximale du système pour une fréquence donnée de la force extérieure.
- d) Le rapport entre la masse du système M et son déplacement maximal  $x_{\max}$ .

#### **Question 17 :**

Que permet d'évaluer principalement le spectre de réponse d'un système mécanique ?

- a) La fréquence naturelle du système en fonction de la masse M.
- b) L'impact des variations de la masse M sur le déplacement statique  $x_{\max}$ .
- c) La réponse maximale du système en fonction des paramètres caractéristiques du système ou de la force extérieure.
- d) La résistance du système à des charges statiques appliquées de manière progressive.

#### **Question 18 :**

Dans le cas d'une sollicitation impulsionale due à une explosion, quelle conclusion est correcte concernant la déformation maximale  $x_{\max}$  d'un système SDOF ?

- a) La déformation maximale  $x_{\max}$  dépend uniquement de la constante de raideur K et de la masse M, mais pas de l'impulsion I.
- b) La déformation maximale  $x_{\max}$  est proportionnelle à la durée de la sollicitation T.
- c) La déformation maximale  $x_{\max}$  dépend uniquement de l'impulsion I et non de la forme de la sollicitation.
- d) La déformation maximale  $x_{\max}$  peut être réduite en diminuant la rigidité K et la masse M.

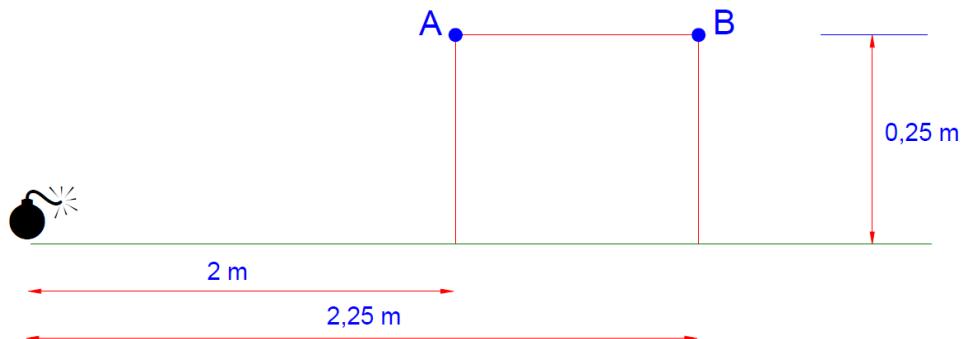
## **Partie 02** : Problème (07 pts)

La deuxième partie évalue votre capacité à appliquer les concepts du module à un cas pratique d'analyse des effets d'une explosion sur une structure. Vous devrez effectuer des calculs analytiques, comparer vos résultats aux données expérimentales, et proposer des solutions pour améliorer la protection de la structure. Soyez précis et méthodique dans vos réponses.

### **Enoncé :**

Un des essais effectués sur le terrain de tir de l'Académie Militaire dans le contexte du module « Effets des explosions sur les structures » avait comme but d'estimer les actions sur une structure par un essai de simulation à échelle.

Une charge de **20 grammes d'explosif plastique (26 grammes en équivalent TNT)** a été mise **sur le sol**, à une distance de **2 m** d'une des faces d'une boîte **B<sub>1</sub> en métal** représentant un immeuble. Les dimensions de la boîte sont : **0,25 m x 0,25 m x 0,25 m**. Une présentation schématique du dispositif d'essai est donnée à la **Figure 1**.



**Figure 1 Présentation schématique du dispositif d'essai**

### **1) Données CONWEP:**

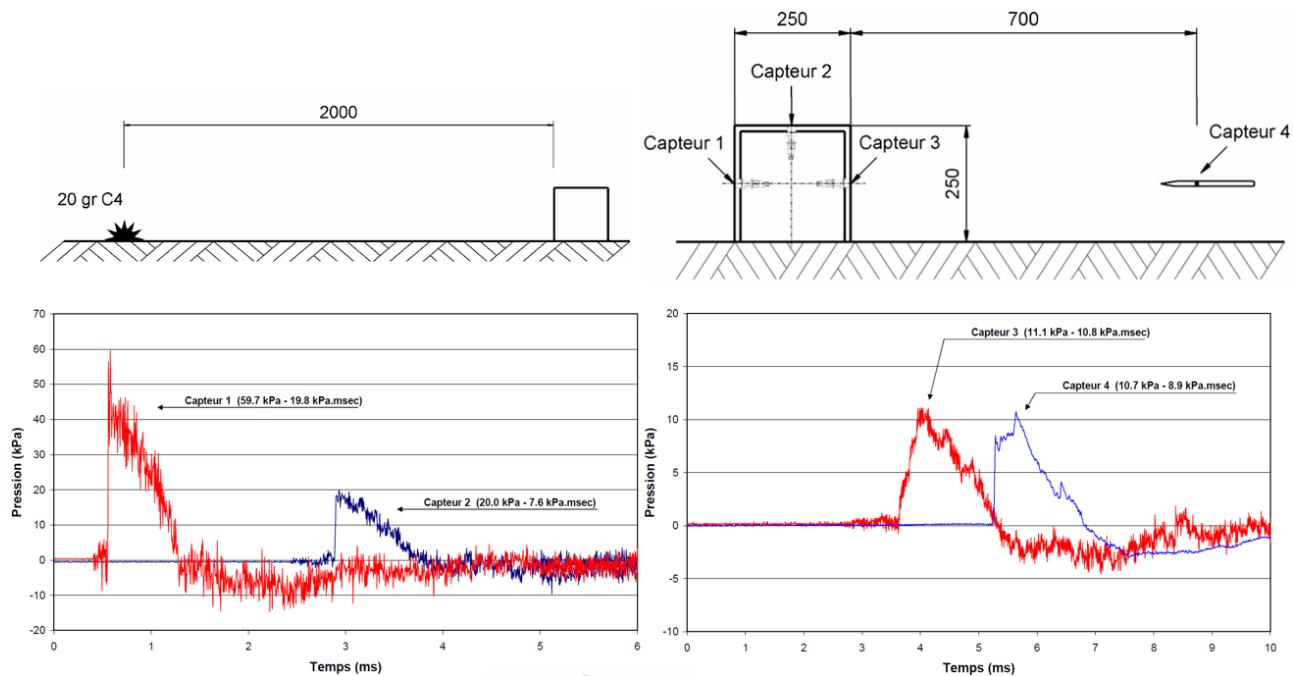
Les données rassemblées dans le tableau 1 ont été obtenues avec le logiciel CONWEP.

$W = 0,026 \text{ kg TNT, hemispherical surface burst}$		
Paramètre	$R = 2 \text{ m}$ (côté avant de la boîte, mesures dans le point A)	$R = 2,25 \text{ m}$ (côté arrière de la boîte, mesures dans le point B)
$P_r (\text{kPa})$	58,09	47,89
$P_{so} (\text{kPa})$	26,31	21,97
$i_r (\text{kPa} - \text{ms})$	26,77	23,57
$i_s (\text{kPa} - \text{ms})$	13,35	11,95
$t_a (\text{ms})$	3,80	4,47
$u_{ODC}$ = vitesse de l'onde de choc (m/s)	376,00	370,00
$q_0 (\text{kPa})$	2,34	1,65

**Tableau 1** Données de base pour le calcul des actions

## 2) Données expérimentales:

Lors de l'essai, on a mesuré les pressions sur le *côté avant*, sur le *toit* et sur le *côté arrière* avec des capteurs intégrés dans les parois de la boîte notés C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> et C<sub>3</sub>, respectivement, et sont indiqués sur le schéma de la *Figure 2*.



**Figure 2 Dispositif de mesure et données recueillies par les différents capteurs**

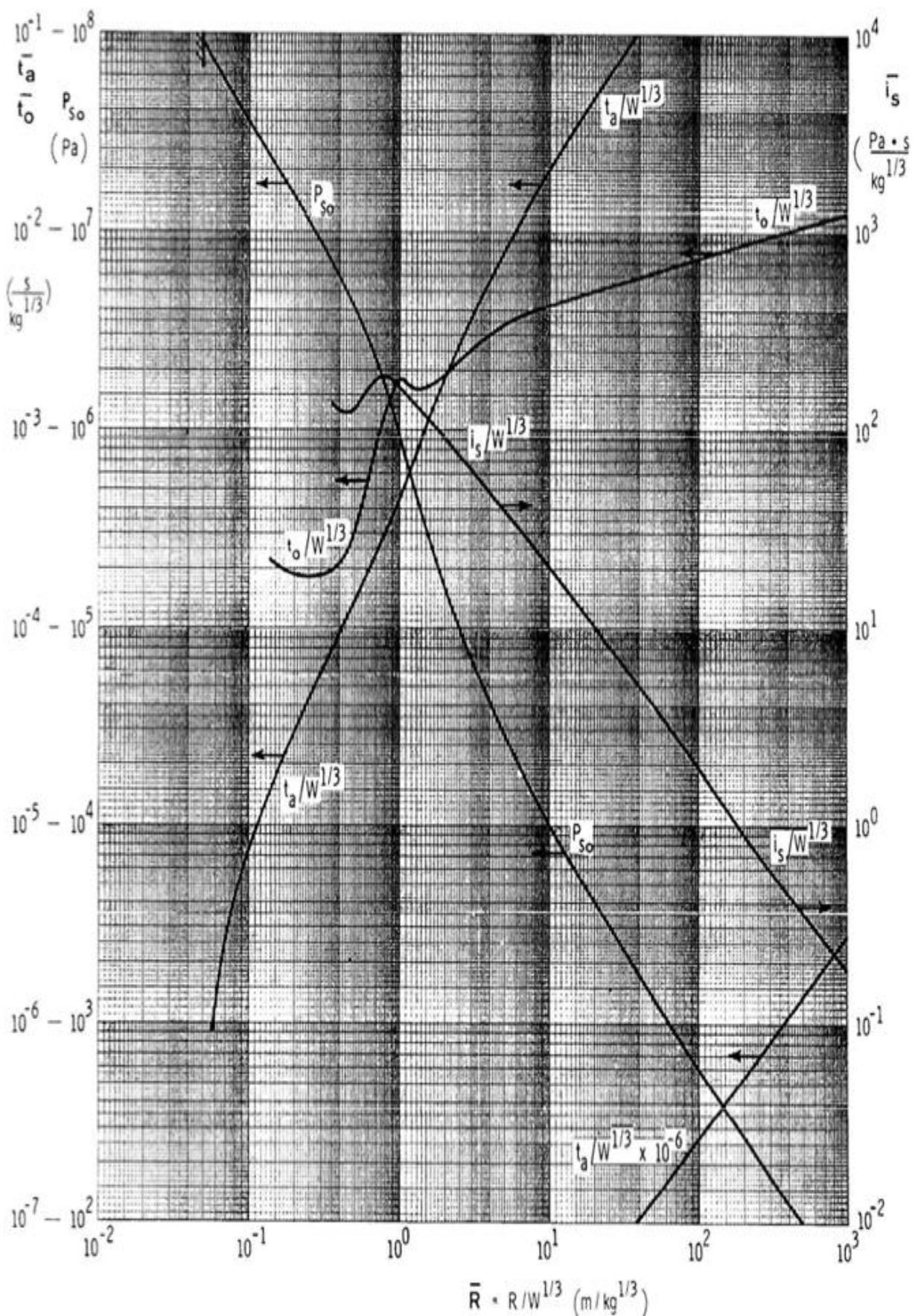
On est uniquement intéressé par les mesures des capteurs C<sub>1</sub> et C<sub>3</sub>, qui montrent ce qui suit :

- C<sub>1</sub> : capteur 1 (côté avant) : P<sub>r</sub> = 59,7 kPa ; i<sub>r</sub> = 19,8 kPa.ms.
- C<sub>3</sub> : capteur 3 (côté arrière) : P<sub>s0</sub> = 11,1 kPa ; i<sub>s</sub> = 10,8 kPa.ms.

## 3) Calcul analytique:

Pour évaluer les actions des ondes de choc sur la boîte B<sub>1</sub>; **On demande d'effectuer les calculs analytiques détaillés** (en se référant à la *Figure 3* qui montre les abaques standards pour des explosions hémisphériques) pour trouver les paramètres suivants (sur les côtés avant et arrière de la boîte) :

- 1) Les distances réduites Z<sub>A</sub> et Z<sub>B</sub>. (01 pt)
- 2) Les pressions incidentes et réfléchies P<sub>s0</sub> et P<sub>r</sub>. (01 pt)
- 3) Les paramètres t<sub>0f</sub>, t<sub>rf</sub>, i<sub>s</sub> et les impulsions i<sub>r</sub>. (01 pt)
- 4) Les vitesses des ondes de choc u<sub>0DC</sub>. (01 pt)
- 5) Les temps d'arrivée t<sub>a</sub>. (01 pt)
- 6) Les pressions dynamiques q<sub>0</sub>. (01 pt)



**Figure 3** Un des abaques de BAKER (BAKER et al., 1983 ; TM 5-855-1, 1987)  
Caractéristiques de l'onde de choc incidente :  $P_{so}$ ,  $i_s$  réduit,  $t_a$  réduit et  $t_0$  réduit en  
fonction de la distance  $R$  réduite

#### **4) Comparaison des résultats:**

**On demande** dans cette partie de l'épreuve de :

- Comparer vos résultats (obtenue dans la Partie 2-3) avec celles obtenues expérimentalement (obtenues dans la Partie 2-2) et d'expliquer l'accord (ou le désaccord) en mentionnant les causes possibles. (0,5 pt)
- Proposer des solutions pour renforcer la protection de la boite B<sub>1</sub> (minimum trois solutions). (0,5 pt)

### **Partie 03 : Problème (04 pts)**

*La troisième partie de l'examen est conçue pour tester vos compétences en résolution de problèmes appliqués aux structures soumises aux effets des explosions. Vous devrez effectuer des calculs détaillés, analyser les résultats obtenus et tirer des conclusions fondées. Assurez-vous de bien suivre les étapes demandées dans l'énoncé et de présenter vos calculs de manière organisée et méthodique. La précision de vos réponses et la clarté de vos explications seront particulièrement prises en compte.*

#### **Enoncé :**

Dans le cadre de l'analyse des réponses d'un système SDOF, on considère un modèle avec les caractéristiques suivantes :

- Masse :  $M=84,8 \text{ kg}$
- Rigidité :  $K=5200 \text{ kN}$
- Résistance maximale :  $R_m=156 \text{ kN/m}$
- Période propre du système :  $\tau=25 \text{ ms}$

On considère les trois cas suivants où le système est soumis à une sollicitation **impulsionnelle** de forme **triangulaire** caractérisée par :

	Amplitude maximale $P_0$ (kN)	Durée de l'impulsion $t_0$ (ms)
Cas I	205	4,8
Cas II	200	24
Cas III	150	40

**1)** Pour le **premier cas**, effectuez un calcul détaillé afin de démontrer que la déformation maximale  $x_{\max}$  reste toujours dans le domaine élastique. Votre réponse devra inclure :

- Le calcul de l'impulsion I. (0,5 pt)
- La détermination de la déformation élastique  $x_{\text{el}}$ . (0,5 pt)
- La vérification que  $x_{\max}$  reste inférieure à la limite élastique  $x_{\text{el}}$ . (0,5 pt)

**2)** Pour le **deuxième et le troisième cas**, effectuez un calcul détaillé (pour chaque cas) afin de déterminer si la déformation maximale  $x_{\max}$  conduit le système dans le domaine plastique. Votre réponse devra inclure :

- Le calcul de l'impulsion I. (0,5 pt)
- La détermination de la déformation maximale  $x_{\max}$ . (0,5 pt)
- La comparaison entre  $x_{\max}$  et la déformation élastique  $x_{\text{el}}$ . (0,5 pt)
- Le calcul du facteur de ductilité  $\mu$ . Concluez si le système reste dans le domaine élastique ou entre dans le domaine plastique, en précisant le facteur ductilité  $\mu$ . (01 pt)