

# -Étude du mécanisme pneumatique et caractérisation de son phénomène d'éclatement ou d'explosion -



# Présentation:

**Exemple :**

*Les défaillances causées par les pneus sont les plus dangereuses après celle causées par le système de freinage et les suspensions parmi ces défaillances : éclatement ou explosion des pneus*



Éclatement de pneu  
arrière droite  
soudainement avec une  
vitesse à 100 km/heure



Éclatement de pneu avant  
gauche lors d'un accident  
que j'ai survécu moi même

Mais ces deux phénomènes  
sont très difficiles à détecter



# Sommaire:

- Problématique: afin de comprendre et prédire le comportement du pneu lors d'une explosion ou éclatement , il est nécessaire de comprendre son mécanisme . L'enjeu ici est d'établir une modélisation de son roulement sur un chaussé et de traiter le phénomène de son éclatement ou d'explosion a travers des simulation numérique
- 1) phénomène d'éclatement et d'explosion des pneus
  - ❖ a-définitions des phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneu
  - ❖ b-éclatement d'origine mécanique
  - ❖ c-éclatement ou explosion d'origine chimique
- ❖ 2) Modélisation simplifié d'un pneumatique:
  - ❖ a-introduction
  - ❖ c-étude d'un pneumatique en roulement
- 3)caractérisation du phénomène d'explosion de pneu:
  - ❖ a-généralité
  - ❖ b-simulation d' une explosion de pneu par la méthode des éléments finis
  - ❖ c-simulation d'un éclatement de pneu par surpression par la méthode des éléments finis

# 1) Phénomène d'éclatement et d'explosion des pneus :

- A-définition des phénomènes d'éclatement ou d'explosion de pneu:

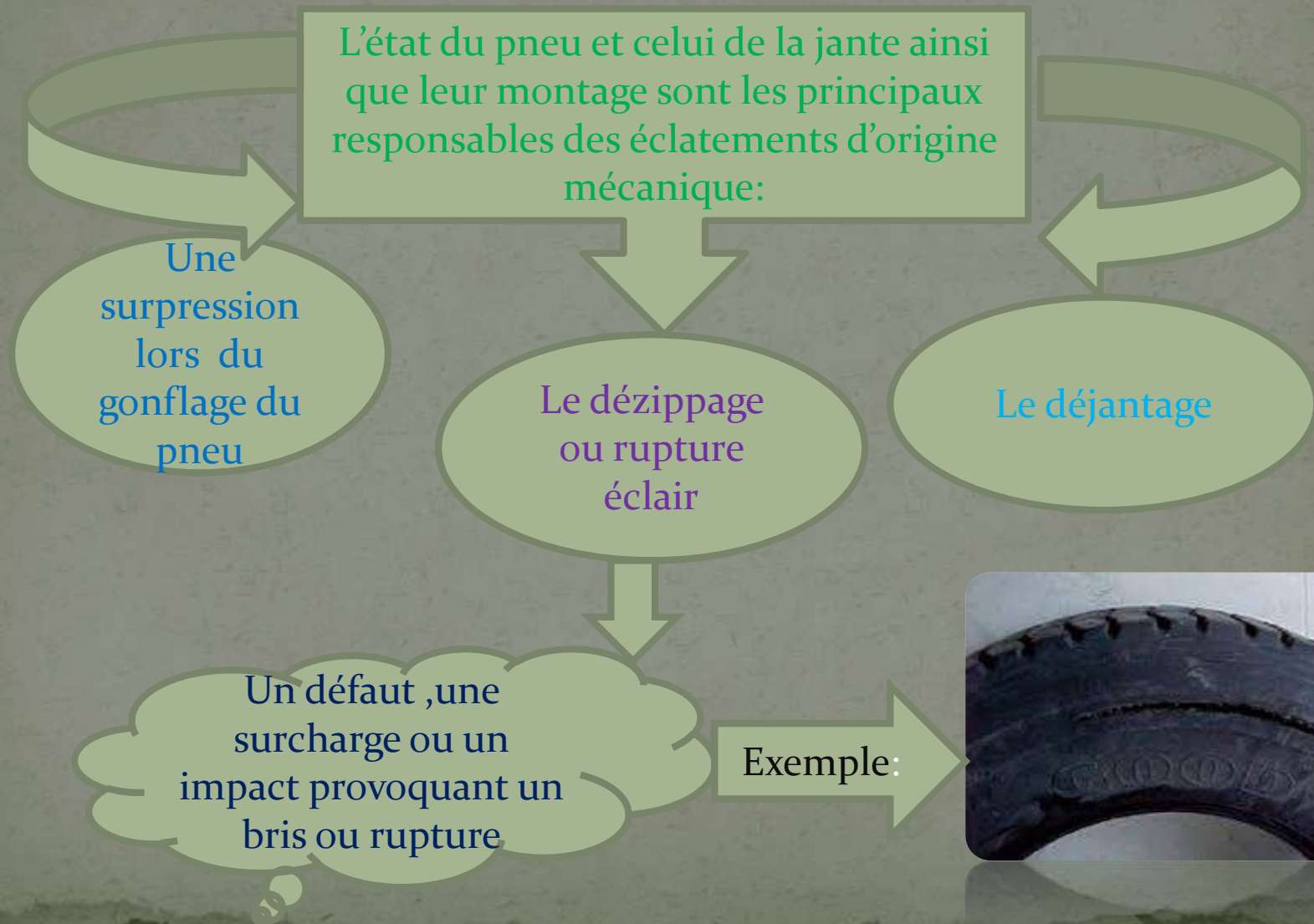
*La différence entre éclatement et explosion étant parfois mal comprise, il est nécessaire à ce stade de définir ces deux phénomènes.*

Un éclatement: correspond a un bris de la structure de pneu lorsque celui-ci ne peut maintenir la pression contenue a l'intérieur

Une explosion: est le résultat d'une réaction chimique impliquant une énergie bien supérieure a celle observée lors d'un éclatement , une onde de choc pouvant atteindre 7 mpa est a l'origine de la rupture du pneu

La principale différence entre les deux phénomènes résulte des pression mise en jeu

# B-éclatement d'origine mécanique



# C-éclatement ou explosion d'origine chimique :

Les explosions ou éclatements de pneus survenant à la suite d'un apport de chaleur sont le résultat de la contribution de trois facteurs: l'expansion thermique de l'air à l'intérieur du pneu, la diminution des propriétés mécaniques de la structure du pneu et une réaction chimique



- La principale cause des éclatement et d'explosion d'origine chimique est le développement de chaleur a l'intérieur de celui -ci.
- Trois réaction chimique sont susceptible de se manifester a la suite d'un apport de chaleur , il s'agit des réactions de :

pyrolyse

thermo oxydation

combustion

Les gaz et les matières inflammables produits lors de la dégradation thermique viennent contribuer a l'augmentation de la pression dans le pneu due a l'expansion thermique de l'air contenu a l'intérieur de celui-ci . Associé a la diminution des propriétés mécanique du pneu .. Il en résulte un éclatement du pneu voire même une explosion dans des conditions très particulières

- En effet la diminution des propriétés de résistance mécanique résulte de l'action directe de la température, d'un vieillissement chimique ou du phénomène de fatigue, la température affecte grandement les différentes propriétés mécaniques statiques et dynamiques des caoutchoucs.
- Réaction chimiques:

Pyrolyse

La décomposition chimique d'une substance sous l'action de la chaleur en absence d'oxygène

Se produit en pratique dans le cas où l'apport d'oxygène est limité par diffusion.



Thermo  
oxydation

Est une oxydation  
provoquée par l'élévation  
de température. Se produit  
à l'intérieur même de la  
carcasse de pneu en  
présence d'oxygène mais en  
quantité insuffisante pour  
une combustion.

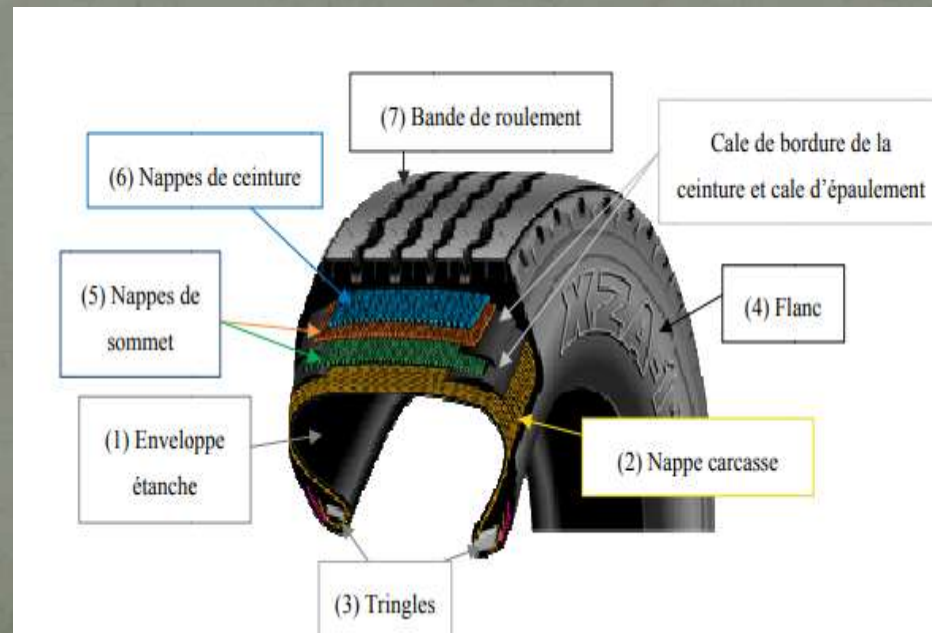
Se distingue de la pyrolyse par des  
températures de dégradations thermique  
beaucoup plus faibles

Combustion

C'est une réaction  
chimique exothermique  
d'oxydoréduction

## 2)Modélisation simplifié d'un pneumatique :

- a-introduction :
- Un pneu est un assemblage solidaire de matériaux aux propriétés très diverses.
- Les composants d'un pneu sont :



# B-étude d'un pneumatique en roulement

- **Hypothèse:**

- On choisit une géométrie circulaire pour la partie du pneumatique qui n'est pas en contact avec la roue .
- On choisit de décrire la zone de contact comme un segment de droite.
- La bande de roulement est en contact avec le sol et on la suppose horizontale.

- **Équation d'équilibre dans la zone de contact :**

- Dans ce sous domaine, les flancs sont relâchés et leur action dans la direction du centre de la roue est nulle. La réaction de la route est dans la direction y. on note  $R(y)$  son module. Dans le repère  $(x,y)$ , les équations d'équilibre s'écrivent:

$$\frac{d\tau_0}{dy} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + (R - e p_i) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = 0$$

- Pour  $0 > y > y_0$ , la tension  $\tau_0$  est constante et sa valeur vaut  $f_1 s_2 e$ . La réaction de la route est déterminée par la pression interne  $R = e p_i$ . En négligeant la résultante de la quantité d'accélération dans tout le pneumatique et toute la roue, l'effort exercé par la route vaut aussi  $P$  le poids du véhicule:

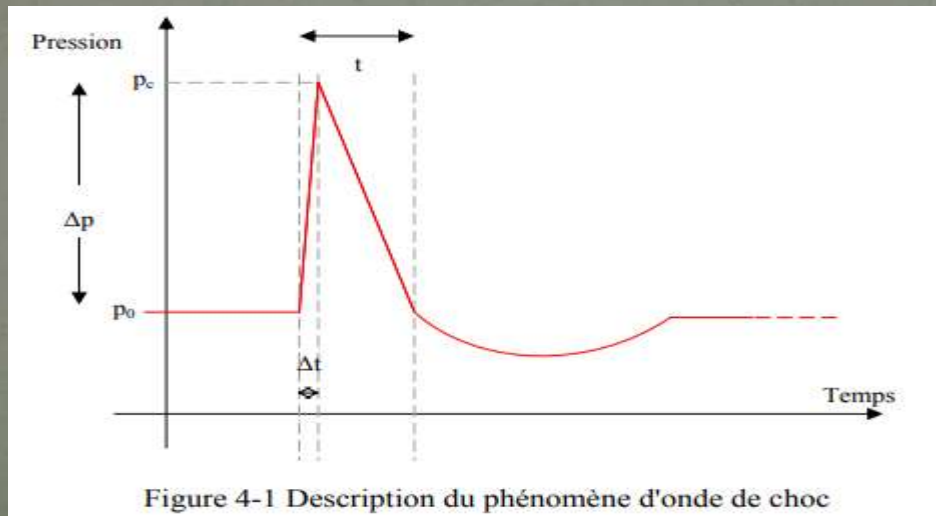
$$2 R_0 e p_i \sin \theta_0 = P$$

- $P$  détermine la position du point de détachement  $\theta_0$ .



### 3) caractérisation du phénomène d'explosion du pneu:

- A-généralité
- Le phénomène d'explosion correspond a une libération soudaine et rapide d'énergie , lorsque elle se produit une onde de choc est générée , en effet celle-ci est le résultat d'une brusque augmentation de pression par déplacement centrifuge d'une mince couche d'air a partir d'un point d'explosion .
- L'onde de choc peut être décrite par deux étapes:



L'onde de surpression est suivie par une onde dite de dépression ou de détente pour laquelle la pression décroît et devient inférieure à la pression initiale.

Les effets d'une explosion dépendent principalement de deux facteurs : la quantité d'énergie de détonation libérée et la distance par rapport à l'explosion.

# B-simulation d'une explosion de pneu par méthode des éléments finis :

- Afin de comprendre et prédire le comportement du pneu lors d'une explosion , il faut simuler le phénomène a l'aide d'un logiciel d'élément finis puisque un tel modèle exige des pas de temps très faible.(logiciel altair radios)
- Hypothèse du modèle: se modèle se compose de :

Charge explosif  
TNT

L'air

Frontière de l'air

Condition de  
rupture du  
modèle

Interfaces fluide-strucutre

## Charge explosif

- Le comportement de la charge explosif est décrit par l'équation d'état de **Jones-Wilkins-Lee (JWL)** qui a été caractérisé pour de nombreux explosif.
- L'équation JWL décrit la relation pression-volume associé au produit chimiques explosif
- Elle définit la pression  $p$  comme:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1} V\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2} V\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (4.1)$$

$A, B, R_1, R_2$   
et  $\omega$  sont  
de cst,   
 $E$ :énergie  
spécifique

Le matériaux défini par la loi 5 dans radios est attribué a la charge TNT, cette loi exige plus de paramètre la densité , et la vitesse de détonation  $V_d$

## L'air

- Le comportement de l'air est modélisé via la loi hydrodynamique, c'est la loi 6 dans radios ,cette loi est adapté pour modéliser les fluides et les gaz, l'équation utilisée est :

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu) E_0 \quad (4.2)$$

$$\mu = \rho / \rho_0 - 1.$$

$\rho_0$  et  $\rho$  sont respectivement les densités initiale et courante de l'air.



## Frontière de l'air

- Elle est modélisée géométriquement : cette frontière permet d'éviter les réflexions d'ondes aux bords du maillage de l'air, elle se comporte comme un filtre passe bas :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \rho c \left( \frac{\partial}{\partial t} (V_n) - V_n \cdot \text{div}(\vec{V} - V_n \cdot \vec{n}) \right) + c \frac{(p_\infty - p)}{2 \cdot l_c} \quad (4.4)$$

$l_c$ :longueur caractéristique et  $c$ :vitesse du phénomène

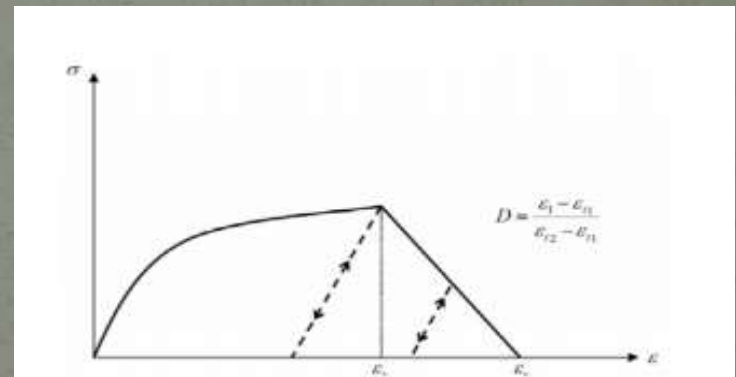
## Interfaces fluide - structure

- La rigidité d'interfaces recommandée en cas d'interaction fluide-structure est déterminée à partir de la formule suivante :

- $\rho$  : densité du fluide
- $v$  : vitesse du phénomène (vitesse du son ou plus élevée pour les phénomènes supersoniques)
- $S_{el}$  : surface des éléments lagrangiens
- $Gap = 1,5 \times$  taille de l'élément fluide

$$St_{fac} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot S_{el}}{Gap}$$

## Condition de rupture des éléments:

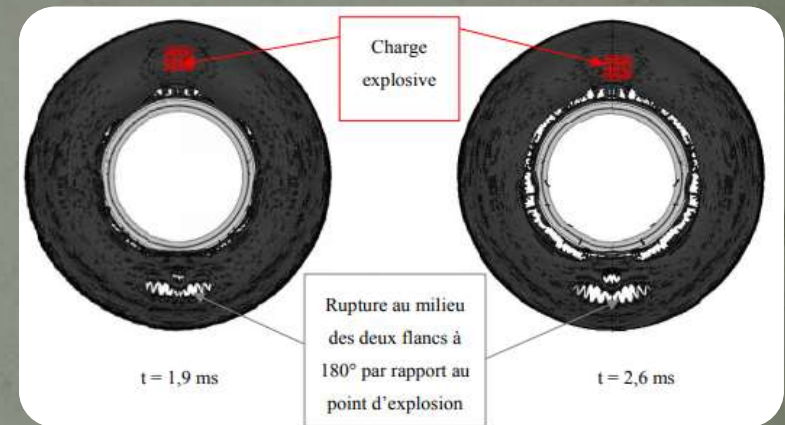


Pour simuler la rupture du pneumatique, une condition de rupture est attribuée aux éléments de la matrice en caoutchouc avec  $D$  est le facteur d'endommagement appliqué lorsque la déformation principale atteint la valeur  $\epsilon_{t1}$  de manière à réduire la contrainte du matériau considéré.

# -résultat de la simulation:

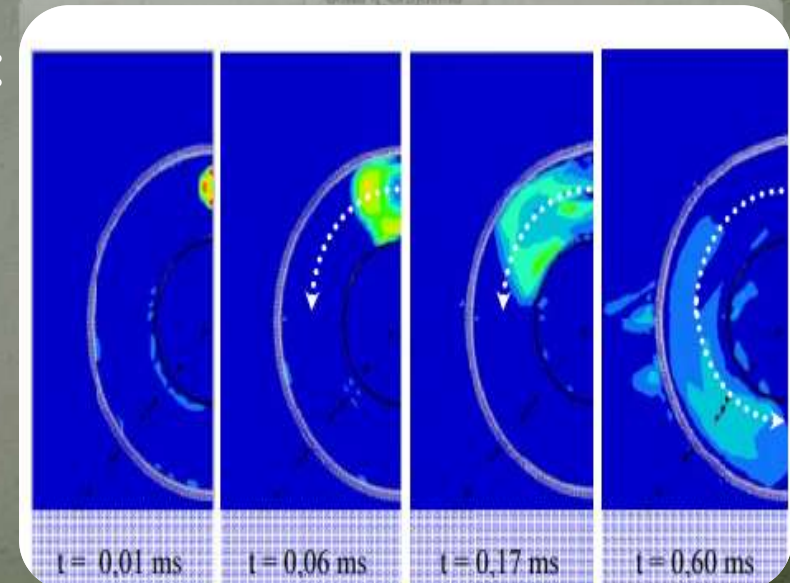
- -mode de rupture :

Les résultat indiquent une amorce de la rupture au niveau de deux flancs, le pneu se déchire ensuite sur toute sa circonférence en bas du flanc



- Propagation de l'onde de choc:

L'onde de pression se déplace circonférentiellement à l'intérieur du pneu à partir du point d'explosion, la rupture du pneu au point diamétralement opposé à ce point provoque ensuite une libération soudaine de l'air des deux côtés des flancs



# Conclusion sur le phénomène d'explosion :

Étape 1 : Une source de chaleur qu'elle soit externe ou interne provoque une augmentation de la température du pneu et de l'air contenu à l'intérieur de celui-ci. La pression à l'intérieur du pneu augmente avec l'expansion thermique.

Étape 2 : Lorsque le caoutchouc du pneu est chauffé à une certaine température (celle-ci peut correspondre à une température de l'air dans le pneu aussi basse que 100 °C), des réactions de dégradation chimique du caoutchouc sont initiées. On peut mentionner la thermo-oxydation, où la présence d'oxygène vient abaisser la température à partir de laquelle la dégradation thermique commence [30]. Ces différentes réactions chimiques produisent des gaz et des matières inflammables qui contribuent à augmenter la pression.

Étape 3 : La température augmente (par l'apport de chaleur et/ou les réactions chimiques), et l'accumulation de gaz et de matières inflammables due à la dégradation du caoutchouc se poursuit.

Étape 4 : Une explosion s'initie lorsque les trois conditions suivantes sont satisfaites :

- une concentration particulière des gaz (1- 8 % du volume)
- une température supérieure à la température d'auto-allumage des gaz
- une présence d'oxygène (concentration supérieure à 5,5 %)

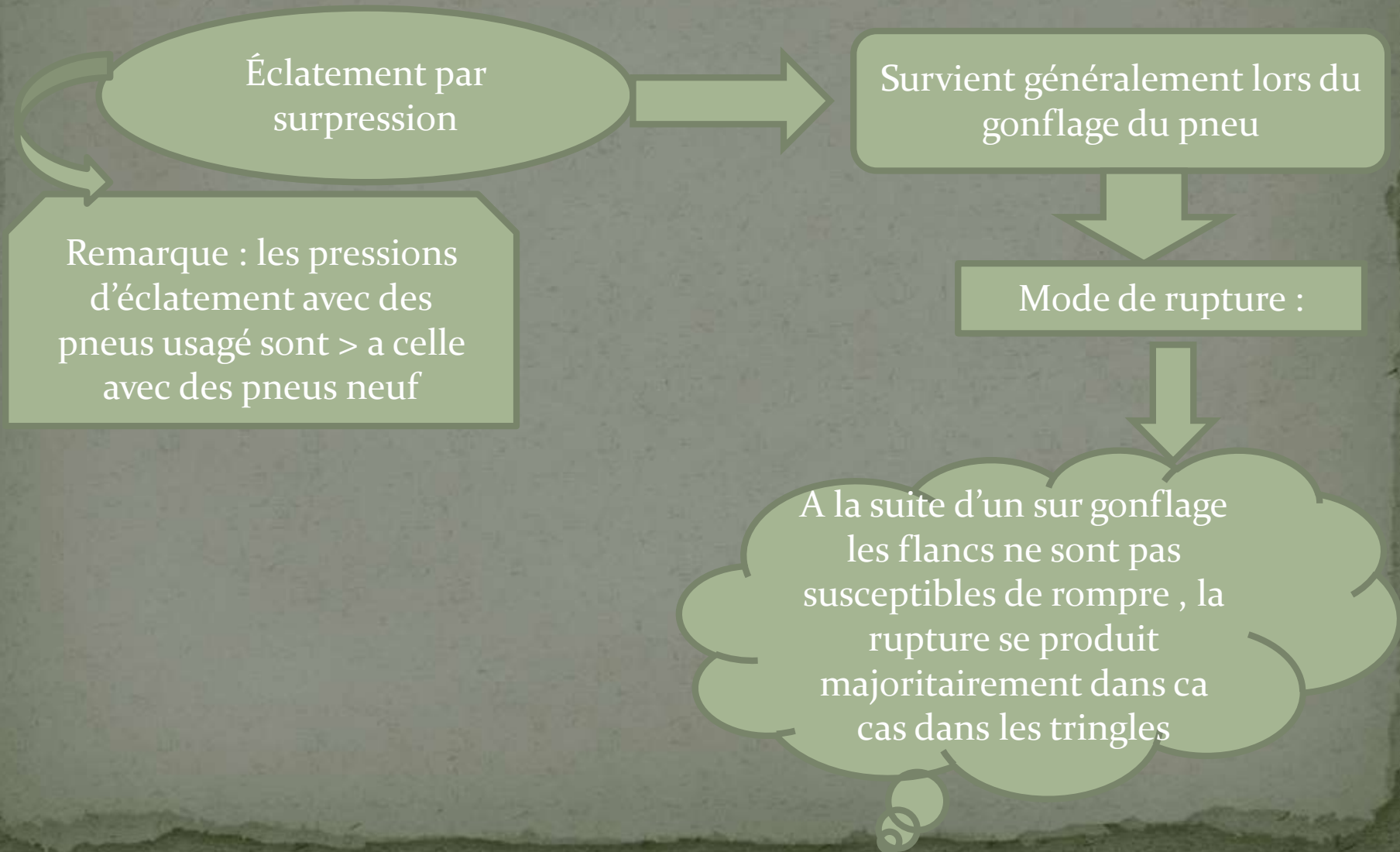
Étape 5 : L'onde de pression résultant du mélange explosif se déplace circonférentiellement dans deux directions à partir du point d'initiation. Les deux fronts d'onde se rencontrent au point diamétralement opposé à ce point

Étape 6 : La rencontre des deux fronts d'onde provoque la rupture du pneumatique au niveau des deux flancs situés à 180° par rapport au point d'initiation.

Étape 7 : La rupture des flancs provoque un déplacement d'air à très grande vitesse à l'extérieur du pneu et s'accompagne de la projection de fragments.



# C-simulation d'un éclatement par surpression par la méthode des éléments finis:



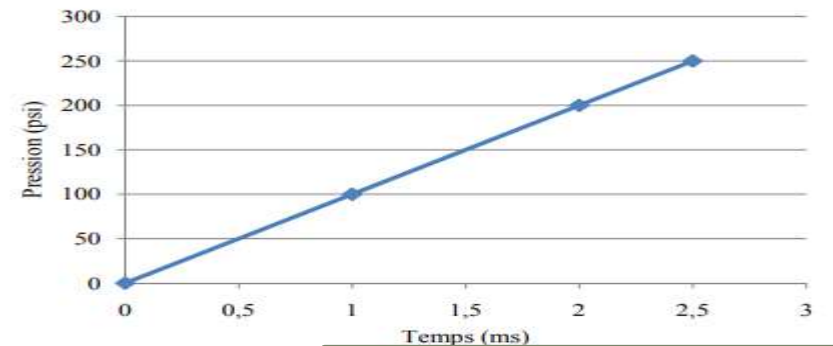
- La simulation d'éclatement par surpression consiste à appliquer au pneu une pression de gonflage de manière progressive

Pression  
imposée au  
pneu

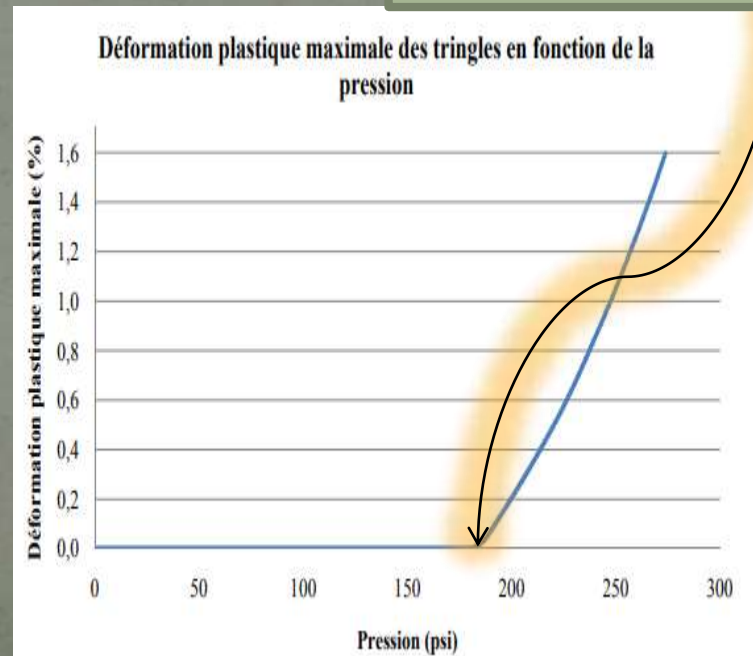


- Résultat de la simulation:

Cette courbe présente l'évolution de la déformation plastique dans les tringles en fonction de la pression. On remarque que les fils d'acier constituant les tringles subissent des déformations plastiques jusqu'à la rupture des brins.



Pression d'éclatement  
= 1.888 MPa



# Conclusion:

- - L'éclatement d'un pneu par surpression résulte d'une augmentation de la pression bien au-delà des pressions nominales recommandées
- Les pressions d'éclatement obtenues avec des pneus usagés sont supérieures à celles observées avec des pneus neufs similaires.
- - La rupture se produit majoritairement dans les tringles.
- - Elle se manifeste plus exactement à un point de chevauchement des fils de la tringle elle-même située à l'opposé du disque de la jante.
- - L'amorce de rupture de la tringle se situe au niveau du fil d'acier localisé dans la partie inférieure de la tringle.
- - L'énergie libérée lors de l'éclatement est très élevée et elle est susceptible de tuer une personne se trouvant à proximité du pneu ou apporter de dommages aux conséquences désastreuses.
- - Le risque d'éclatement par surpression peut être limité par l'utilisation systématique de règles de sécurité (système de retenu lors du gonflage, valve de sécurité du compresseur et distance minimale sécuritaire).



# Conclusion générale:

- L'onde de pression résultant du mélange vi explosif se déplace circonférentiellement dans deux directions à partir du point d'initiation. Les deux fronts d'onde se rencontrent au point diamétralement opposé au point d'initiation et la rencontre des deux fronts d'onde provoque la rupture du pneumatique au niveau des deux flancs. La rupture des flancs provoque alors un incroyable déplacement d'air à très grande vitesse à l'extérieur du pneu et s'accompagne de la projection de fragments.
- L'éclatement de pneu par surpression, quant à lui, survient lorsque le pneu est gonflé bien au-delà de la pression nominale recommandée.
- En pratique, la pression exercée entraîne la plupart du temps une rupture au niveau de la tringle située du côté opposé au disque de la jante. La rupture se manifeste plus exactement à un point de chevauchement des brins d'acier de ladite tringle. L'énergie libérée lors de l'éclatement est alors susceptible de tuer une personne se trouvant à proximité du pneu.