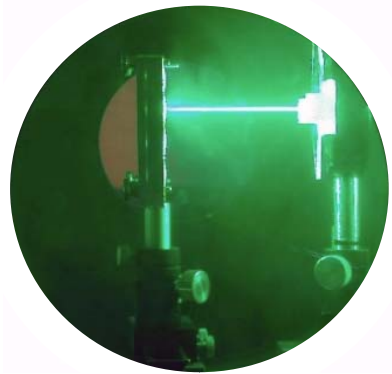


**Étude numérique et expérimentale de la séparation  
par chocs brefs d'interfaces de revêtements  
multicouches.  
Application au test d'adhérence par choc laser**



Thèse présentée par  
Cyril Bolis

Directeur de thèse : Michel Boustie  
Encadrement : Laurent Berthe



# Les revêtements et leur utilité

## Barrières thermiques

(pièces de fonderie, lingotières)



KME Tréfinméteaux

Substrat  
Propriétés 1

Couche  
Propriétés 2



Objets revêtus =  
(Propriétés 1) U (Propriétés 2)

## Esthétisme



Claude Monet, "Le jardin de l'artiste à Vetheuil", 1860

## Amélioration de la tribologie, de l'usure



Renault F1

Réalisation de fonctions **impossibles** à obtenir autrement

**Ex :** blocs moteurs en aluminium revêtus par projection plasma = > diminution de la consommation de carburant de **2 à 4 %**

*Barbezat G., Thermal Spray Solutions : Advances in Technology and Application, ITSC 2004, Osaka, may 2004*

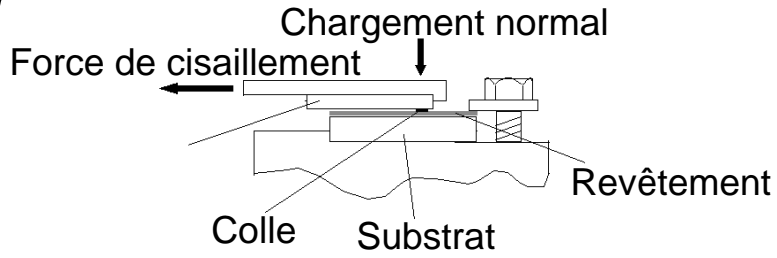
# Les tests d'adhérence

Adhérence ↗ = > Durée de vie de la pièce ↗

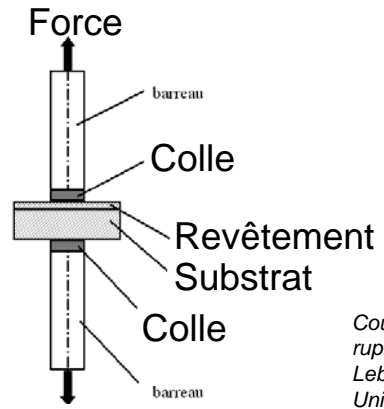
Utilisation de tests d'adhérence

## Tests "classiques"

### Cisaillement



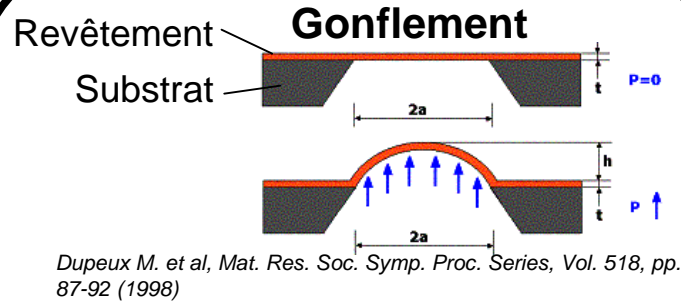
### Plot Collé



*Cours de Mécanique de la rupture fragile, Jean-Baptiste Leblond, DEA Mécanique, Université Paris 6 (2002)*

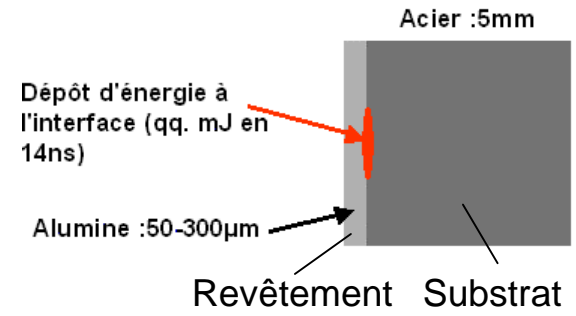
## "Nouveaux" tests

### Gonflement



*Dupeux M. et al, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Series, Vol. 518, pp. 87-92 (1998)*

### Thermo-élastique



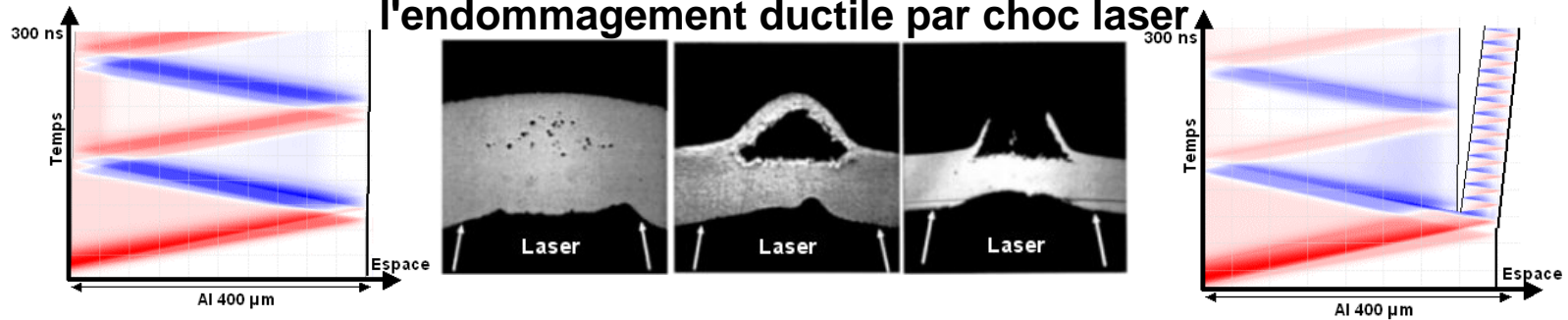
*Rosa Gaëlle, Thèse de l'Université de Bourgogne, 2001*

Difficultés de mise en œuvre  
Difficultés d'utilisation industrielle

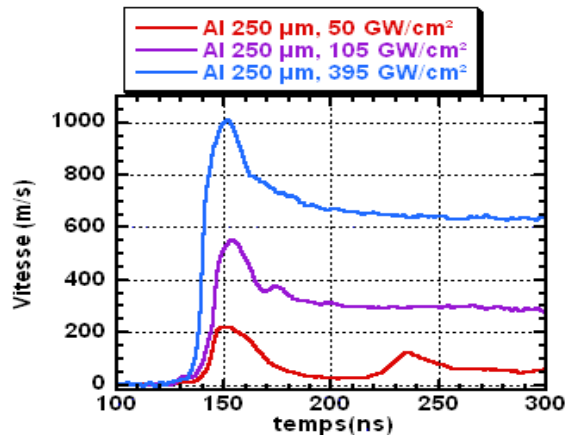
Création d'un nouveau type de test sans contact : **TEST LASAT**

# Historique et état de l'art

## Mise en évidence post-mortem de l'endommagement ductile par choc laser



## Utilisation de la vitesse de surface libre pour la détermination de l'endommagement



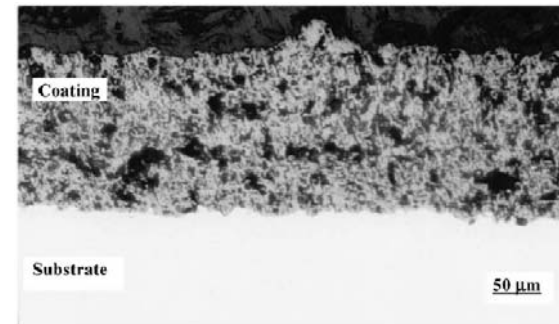
Tollier Laurent, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 1996

Antoun T., Seaman L., Curran D.R., Kanel G.I., Razorenov S., Utkin A., "Spall Fracture", Ed Springer Verlag, 2003

## Utilisation de l'endommagement à l'interface pour les tests d'adhérence

Vossen J.L., ASTM STP 640, K.L. Mitall, Ed., American Society for Testing and Materials, 1978, pp. 122-133

Auroux Eric, "Etude de l'adhérence de couches minces sur des substrats soumis à un choc laser", Thèse de l'université de Poitiers, 1999

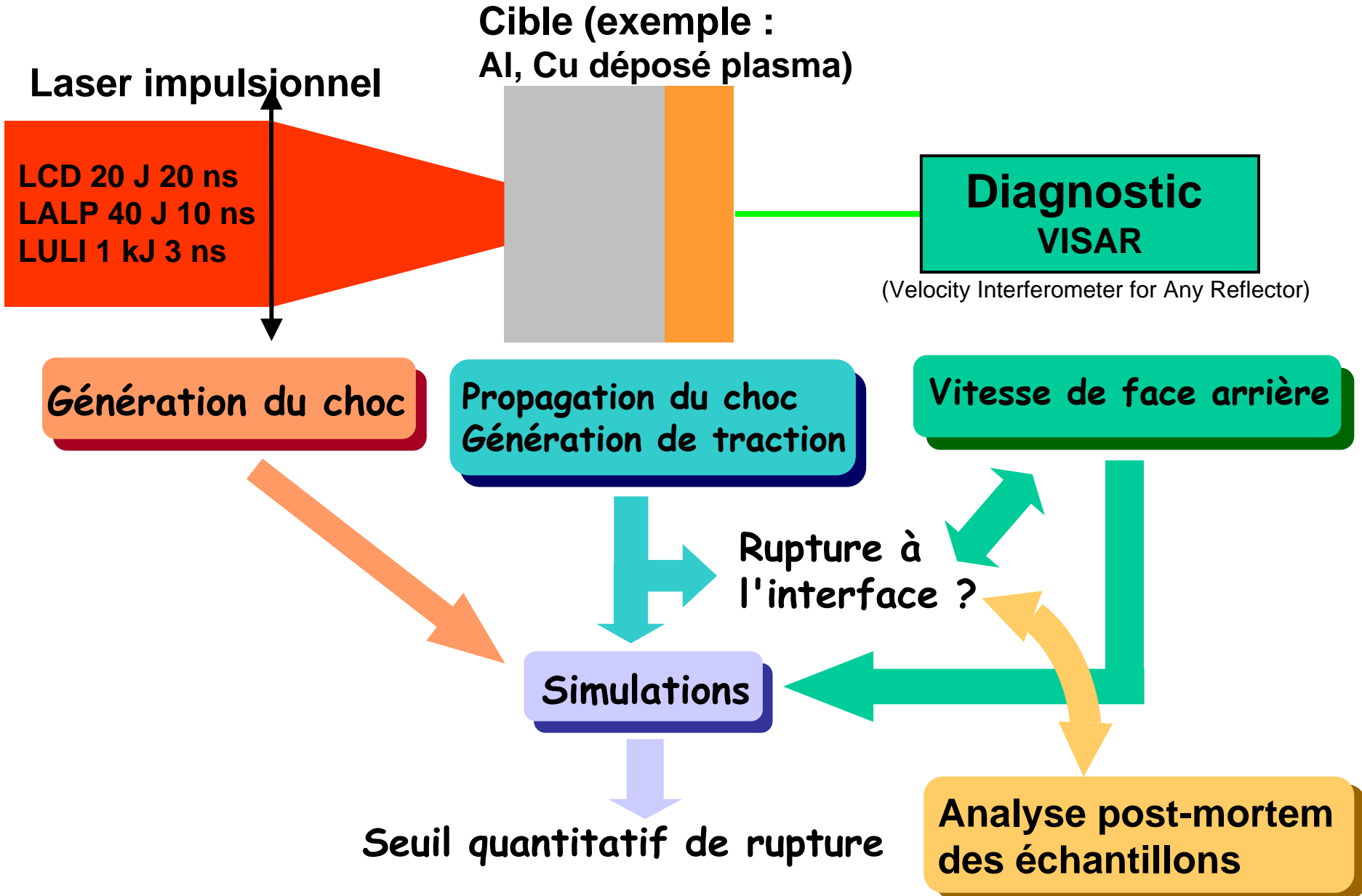


Kobayashi et al, "Study on the interface strength of zirconia coatings by a laser spallation technique", Vacuum 73 (2004)



Combinaison des deux techniques pour mesurer les **seuils d'adhérence**

# Le test d'adhérence par choc laser



# Protocole du test LASAT

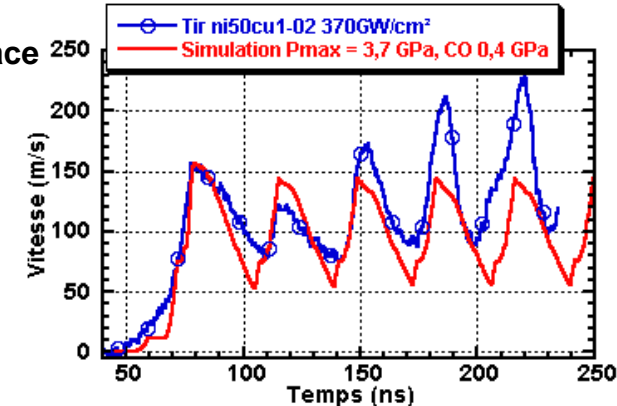
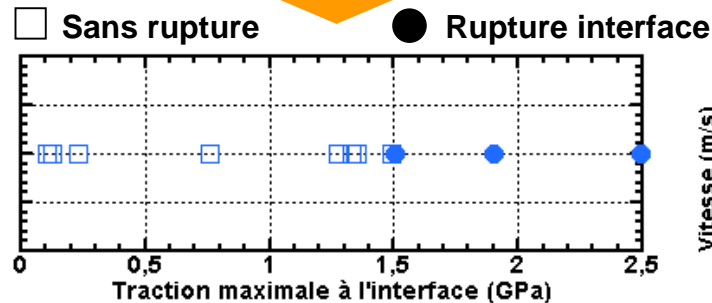
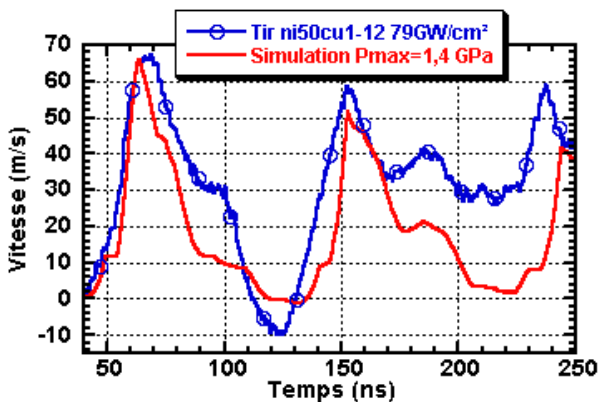
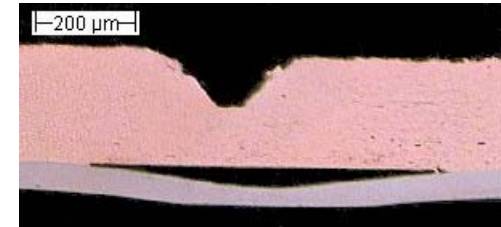
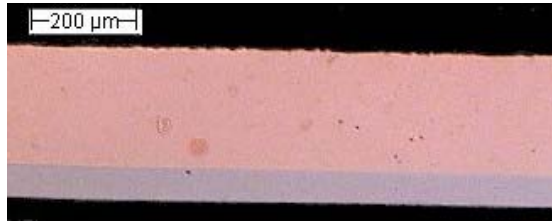
Flux laser = Énergie / ( durée de l'impulsion x surface de focalisation )

Pression maximale du chargement

Ex : cible Cu 120 µm, Ni 110 µm

Apparition de débouchés supplémentaires

SEUIL QUALITATIF



SEUIL QUANTITATIF

Accord expérience / simulation

SIMULATIONS : Traction maximale à l'interface

# Le projet LASAT



Génération du choc  
(impact laser, MBI, plaque)

Arrigoni Michel



Propagation des ondes  
(porosité, rugosité)

Barradas Sophie



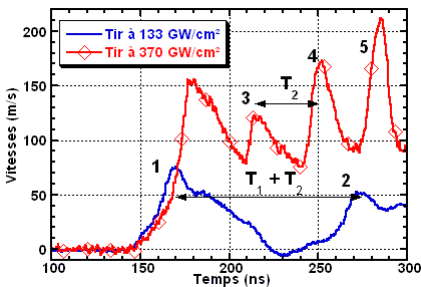
Morphologie de l'interface  
/ Métallurgie de l'interface  
(couple Al / Cu)

Rupture de l'interface

Bolis Cyril



Analyse et simulation des  
signaux de vitesse



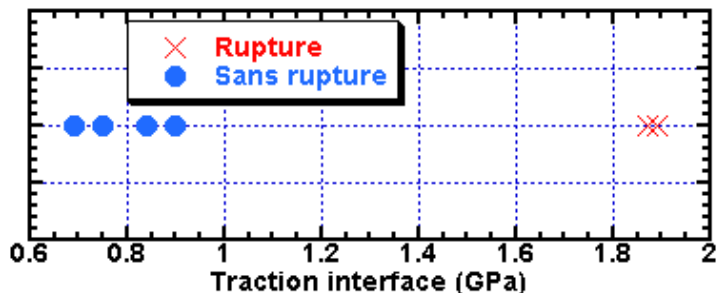
Industriels partenaires : \_\_\_\_\_



**SULZER METCO**  
The Coatings Company™

# Objectifs de ce travail

## Cibles modèles (substrat Cu / couche Cr ou Ni électrolytiques)



Détermination des **mécanismes** créant des états de traction à l'interface

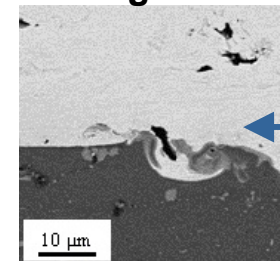
Approches **1D analytique, 1D numérique et 2D**

**Validation** complète du démonstrateur sur des cas simples (seuils quantitatifs en GPa)

## Cibles complexes (substrat Al / couche Cu déposé par projection thermique)

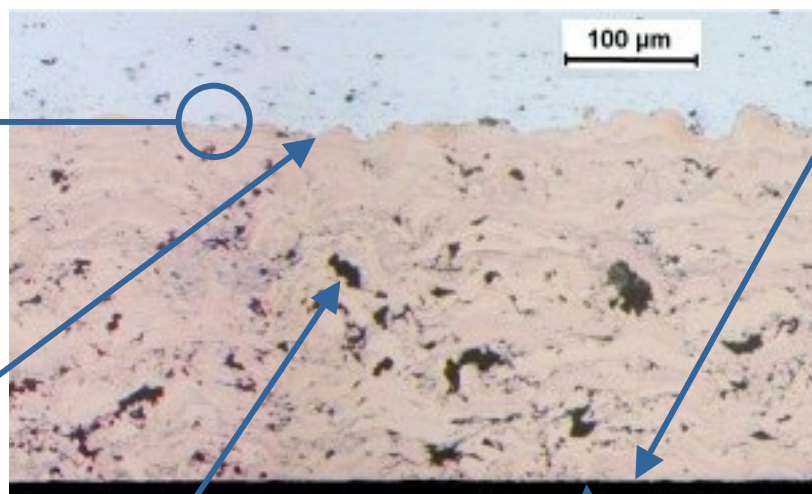
Métallurgie de l'interface

Épaisseur du substrat => **effets 2D**



(intermétalliques, fissures)

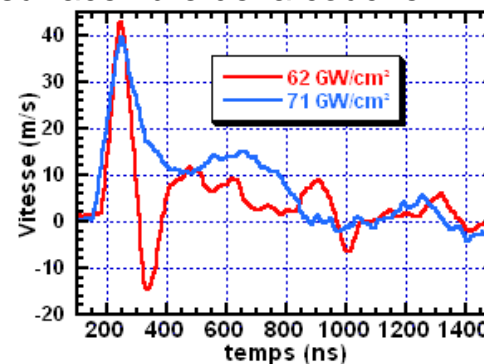
**Rugosité** de l'interface



**Porosité** de la couche de cuivre

**Rugosité** de surface

Analyse des signaux de **vitesse** de surface libre de la couche

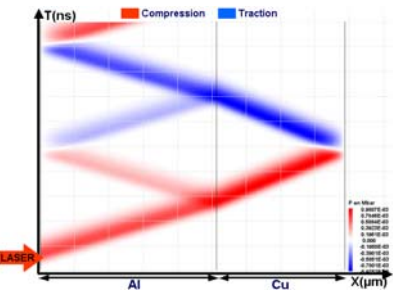


Sensibilité du test / seuils **qualitatifs**



# Plan de l'exposé

---



## 1. Les mécanismes 1D de création de traction à l'interface

- Classification 1D
- Optimisation 1D

# 1.1 Étude Analytique : étude d'un exemple

Paramètres des matériaux :

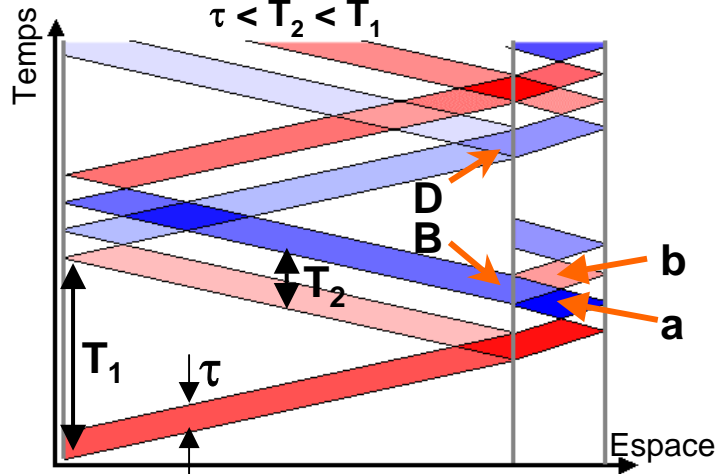
$$Z_i = C_0 \rho_0 \quad T_i = 2 \times e p_i / C_{0i}$$

$$Z = Z_1 / Z_2$$

Paramètres du chargement :

$\tau$  = durée de l'impulsion à mi-hauteur  
 $P_0$  = Pression maximale du chargement (=1)

Cas général



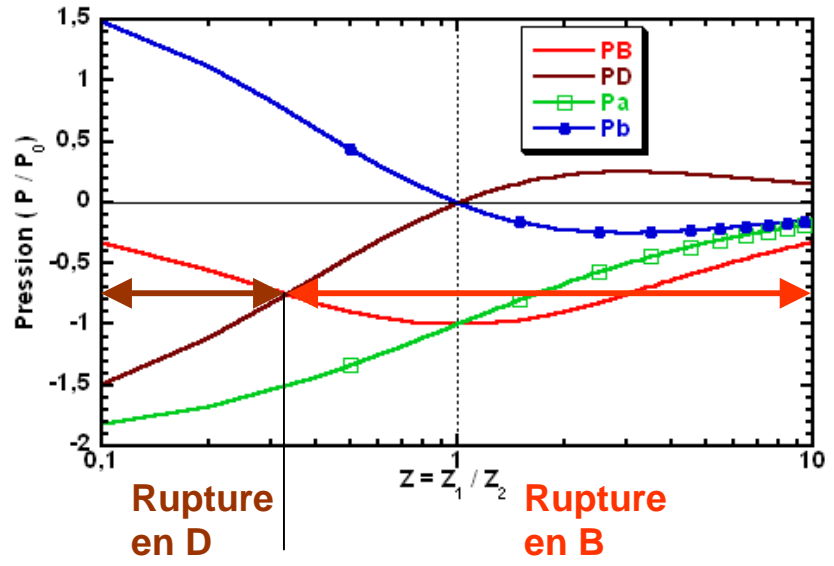
$$P_B = -4 \frac{Z}{(Z+1)^2}$$

$$P_D = 2 \frac{Z-1}{(Z+1)^2}$$

$$P_a = \frac{-2}{Z+1}$$

$$P_b = -2 \frac{Z-1}{(Z+1)^2}$$

Évolution de la traction avec Z



Approche analytique :

- Classement des cibles :  $Z, T_1, T_2$
- Pour un couple de matériaux donnés ( $Z$  connu)

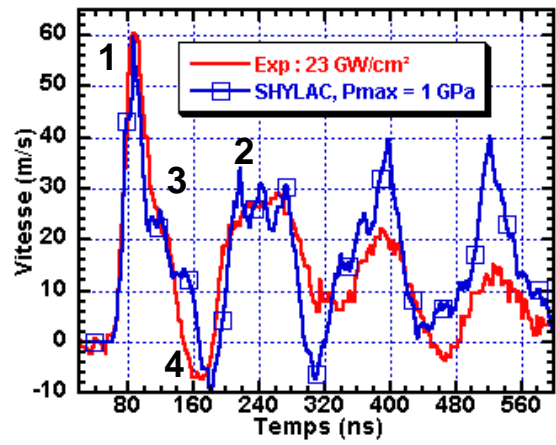


Connaissance de **l'état maximal de traction** à l'interface et dans la couche : prévision de la rupture.

Détermination de la configuration la plus **adéquate** ( $T_1, T_2, \tau$ ) en fonction des seuils à mesurer (avec ou sans endommagement de la couche)

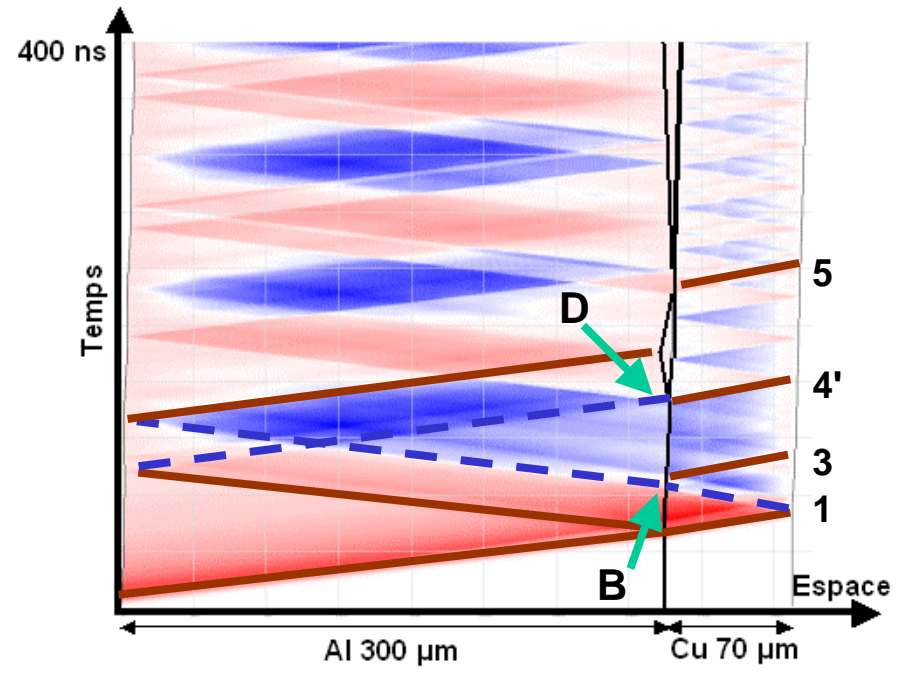
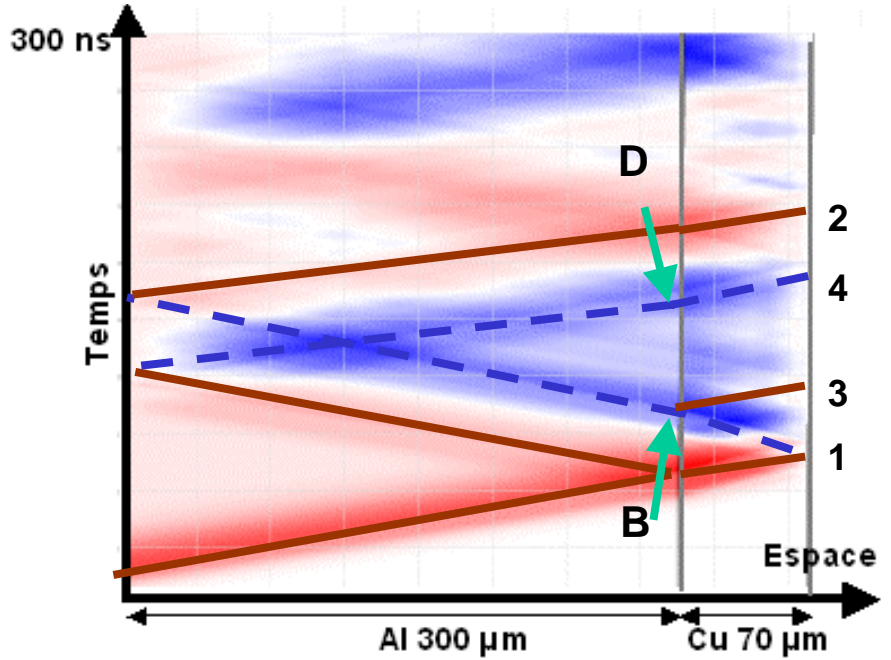
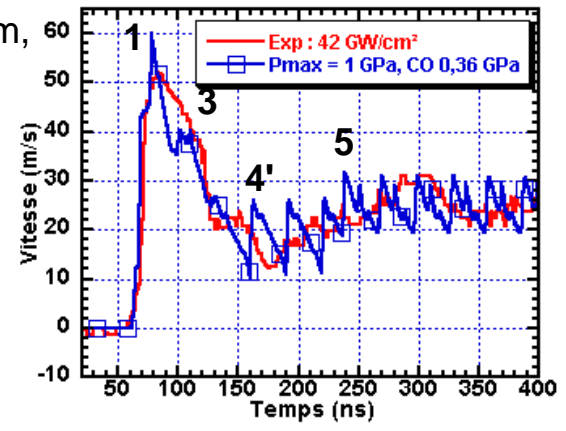
Possibilité d'**optimisation** de la configuration

# 1.2 Cibles Al / Cu : simulations



exemple : Al 300 $\mu$ m / Cu 70  $\mu$ m,  
avec et sans rupture de  
l'interface

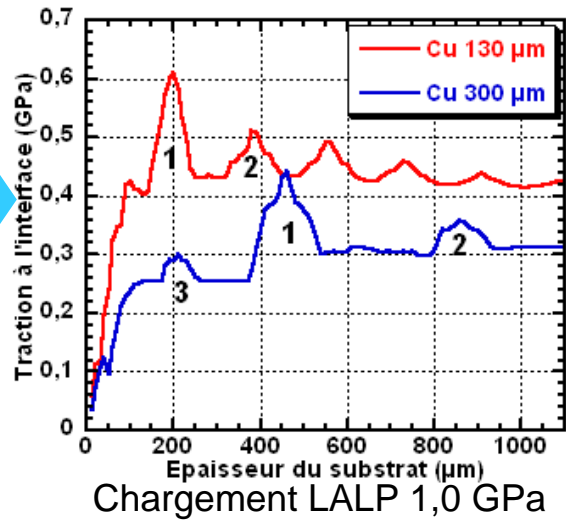
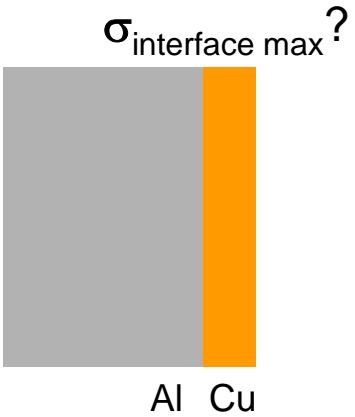
Lois élastoplastique parfaite  
Tuler Butcher à l'interface



Simulations possibles pour les **faibles** épaisseurs de Cu et pour **certain**s tirs uniquement...

# 1.3 Mise en évidence de l'optimisation 1D sur Al/Cu

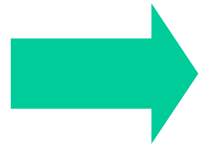
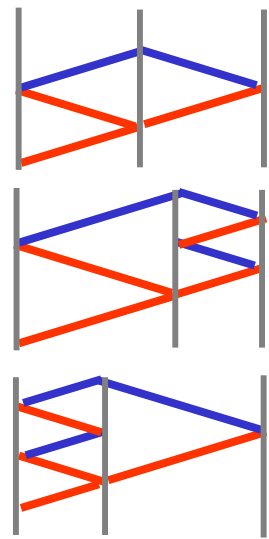
Cas  $Z < 1$  ( $Z_{Al} < Z_{Cu}$ ) Pour une épaisseur de Cu donnée, quelle est l'épaisseur de substrat la plus adéquate?



Point 1 :  $T_1 = T_2$

Point 2 :  $T_1 = 2 T_2$

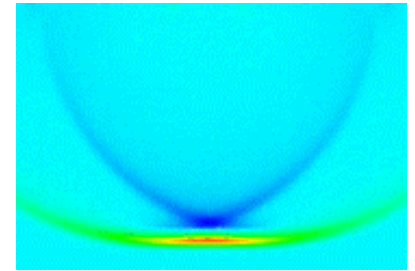
Point 3 :  $2 T_1 = T_2$



- Optimisation 1D** = synchronisation des ondes de traction à l'interface
- Obtenu pour toutes les **épaisseurs** de cuivre
- Ne dépend pas de la **durée de l'impulsion** de pression (applicable aux tests par impact)
- N'est valable que pour le cas  $Z_{substrat} < Z_{couche}$  : dans le cas contraire la réflexion de l'onde de choc initiale sur l'interface est une onde de détente
- Le niveau de traction dans la couche est le **même** que celui à l'interface

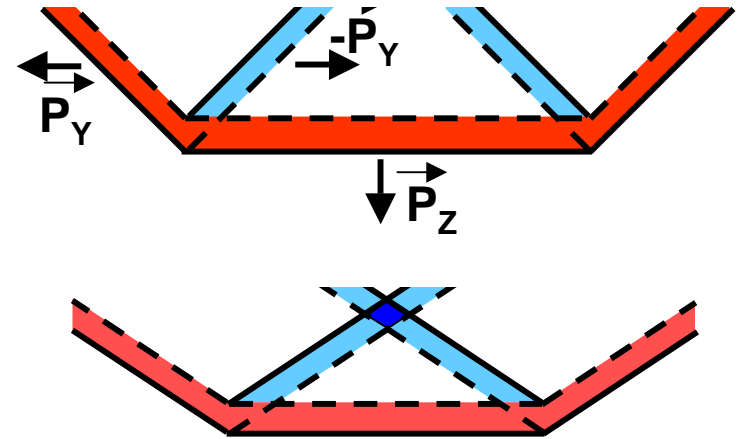
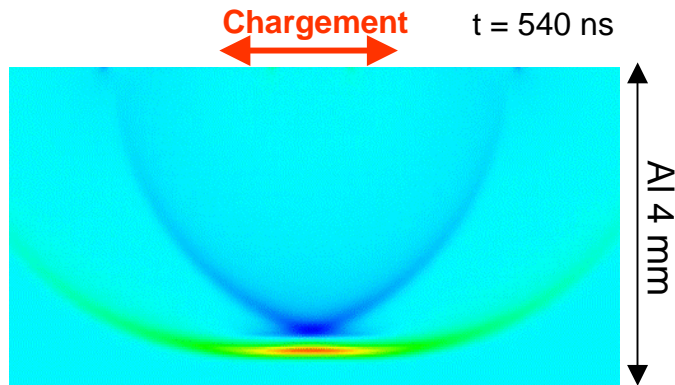
## 2. Création de traction par les effets de bord

- Approche 2D : nouvelle source de traction
- Influence des effets de bord sur l'interface

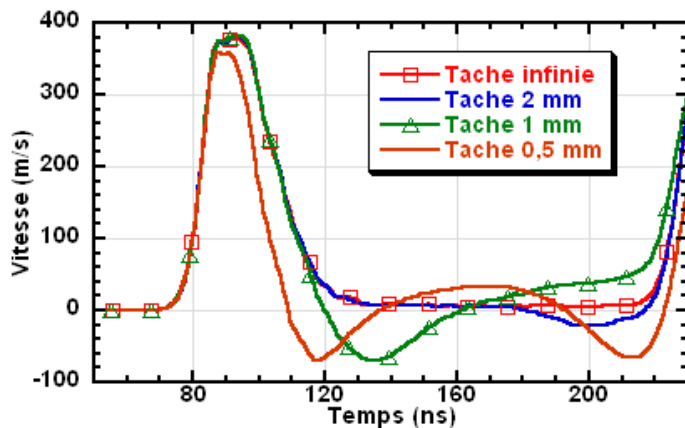


# 2.1 Génération de traction par les effets de bord

## Influence de l'étendue latérale de la zone de chargement



Évolution du débouché négatif sur Al 470  $\mu\text{m}$  en fonction de la dimension de la tache de chargement



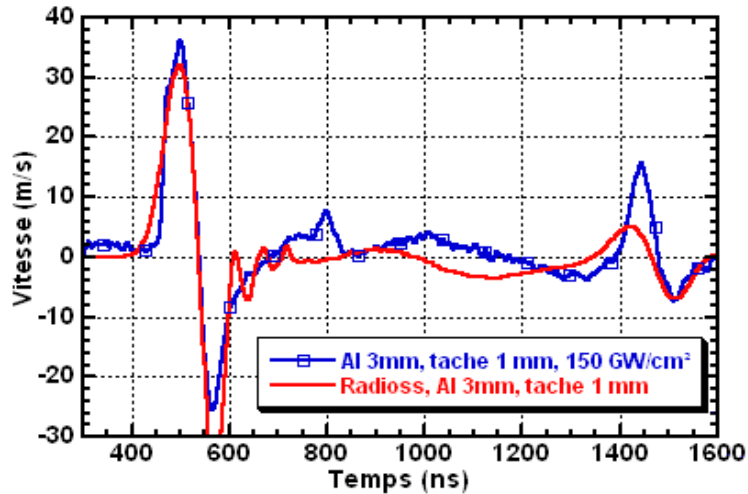
Effets de bord génèrent une **onde de traction** sans nécessiter une réflexion

Induit une **atténuation** plus importante de l'onde principale.

Cette onde de traction se traduit sur les signaux de vitesse par un **débouché négatif** intervenant plus ou moins tôt dans le signal de vitesse

## 2.2 Vérification expérimentale

Ex : Al 3 mm

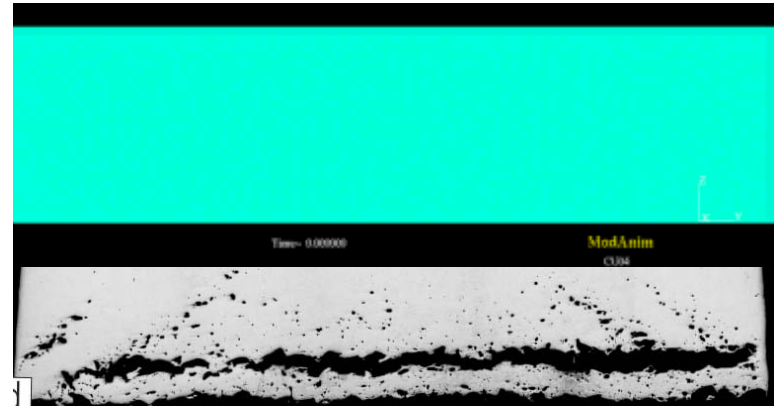


Non reproduit par SHYLAC

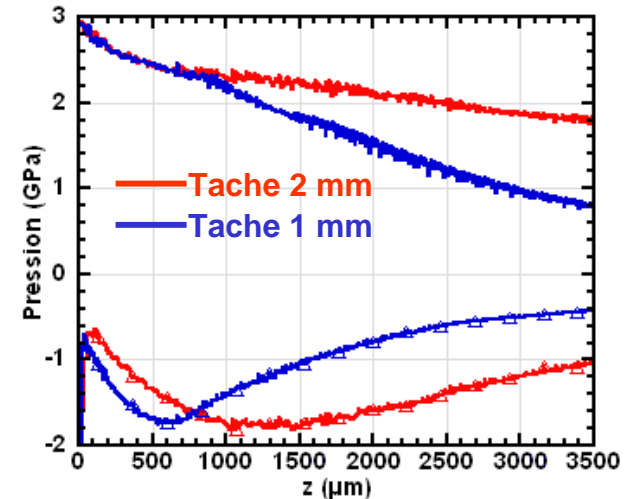
Reproduit par RADIOSS

→ Possibilité de **rompre l'interface** par les effets de bord  
**Choix** de l'épaisseur de substrat la plus adéquate pour utiliser ces effets

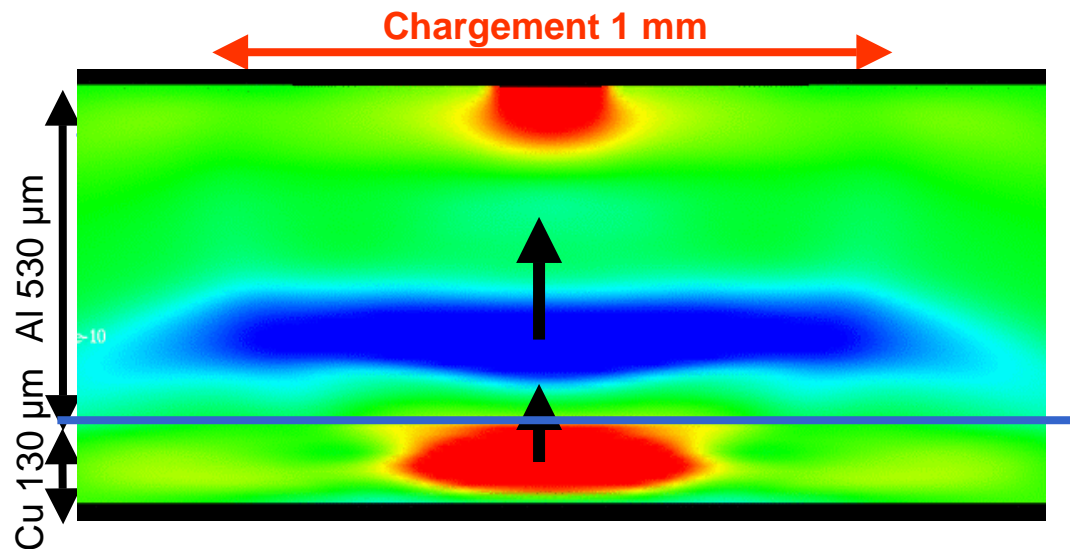
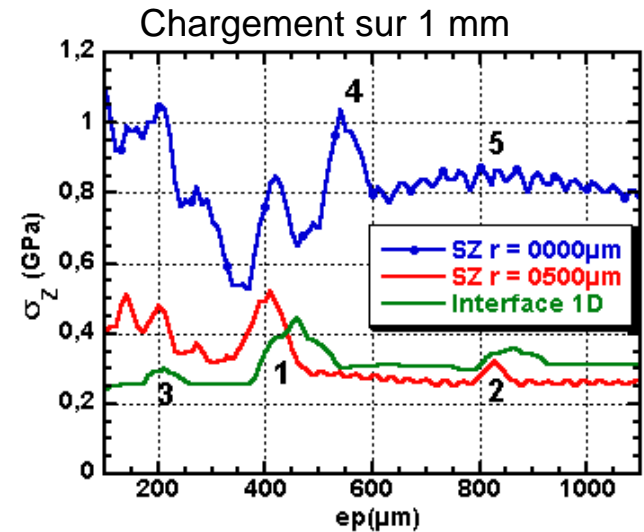
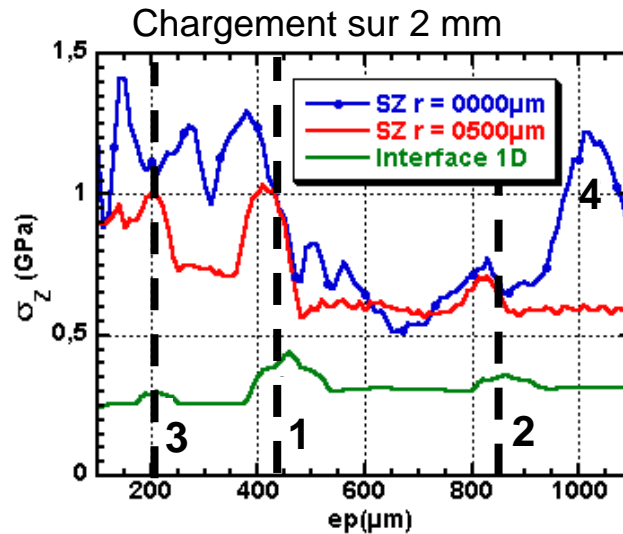
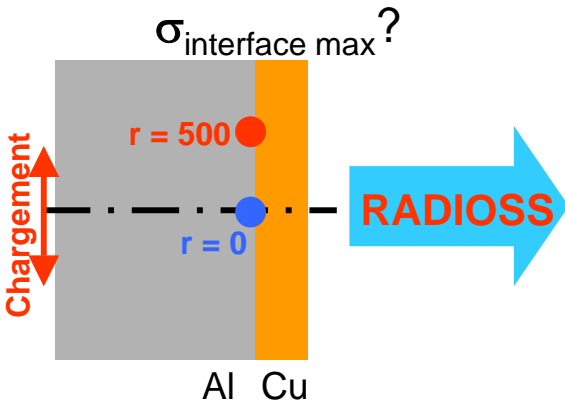
Endommagement sur une couche de Cu



HIXSON R. S., GRAY G. T., RIGG P. A. et al, AIP Conference Proceedings Vol 706(1) pp. 469-472. July 20, 2004



## 2.3 Effets de bord et l'interface



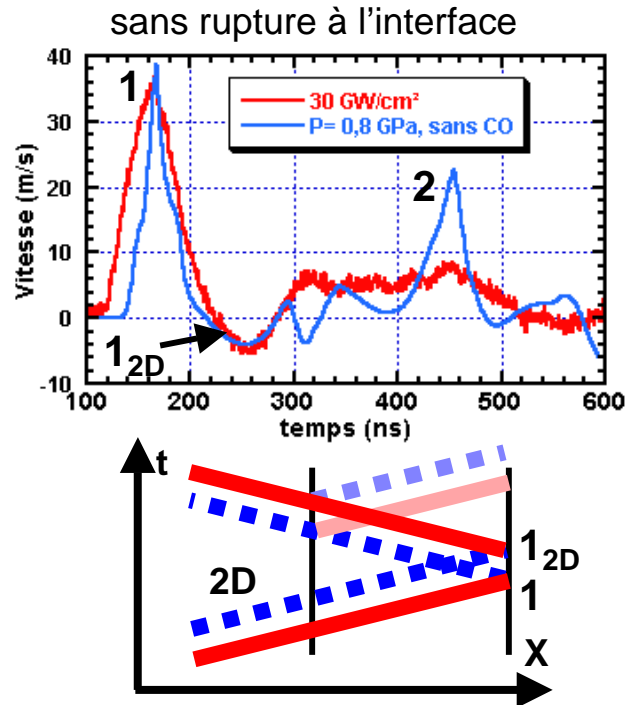
Nouvelle forme d'optimisation =  
**optimisation 2D**

Dépend de l'épaisseur de la  
couche, de celle du substrat et de  
la dimension de la zone de  
chargement

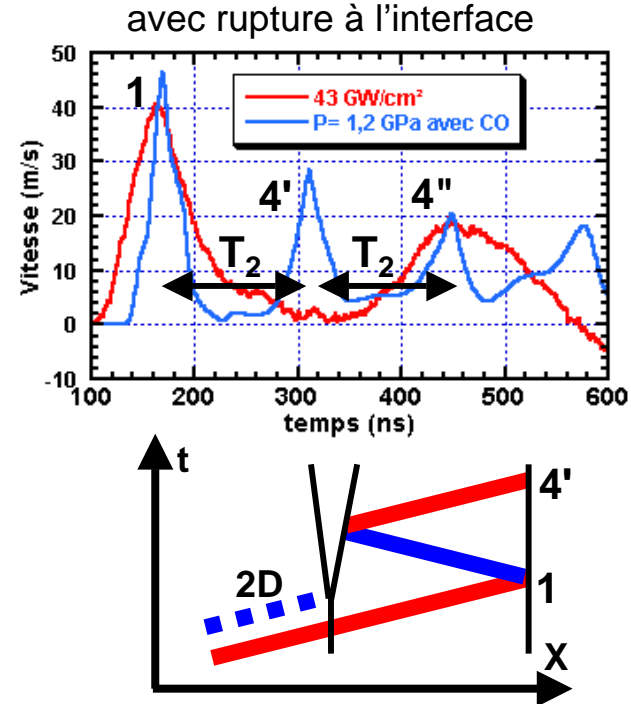
Synchronisation à l'interface des ondes de traction 1D et 2D



## 2.4 Rupture de l'interface et signaux de vitesse

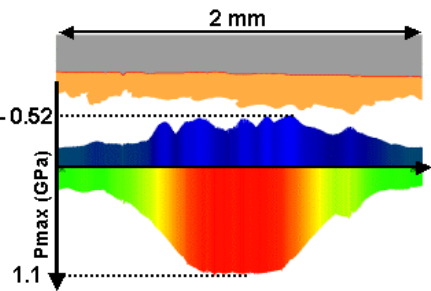


1D ou 2D : un **unique critère** :  
apparition sur les signaux de  
vitesse d'allers et retours à  $T_2$



2D : disparition du débouché  
négatif = rupture de l'interface  
**par effets 2D**

Exp: accord **non obtenu** pour le  
Cu plasma mais confirmation  
des effets 2D

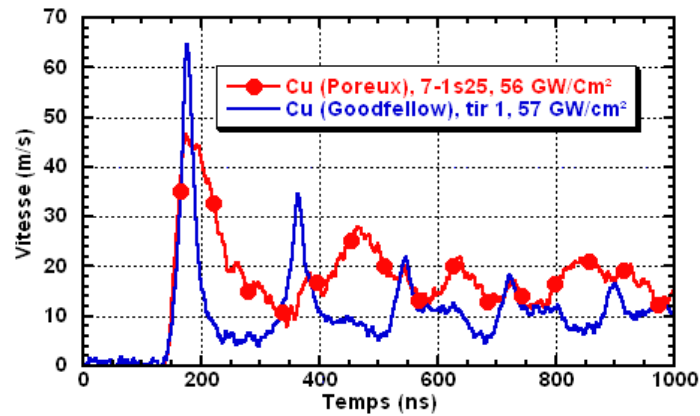


## 3. Cibles complexes : maillages réalistes

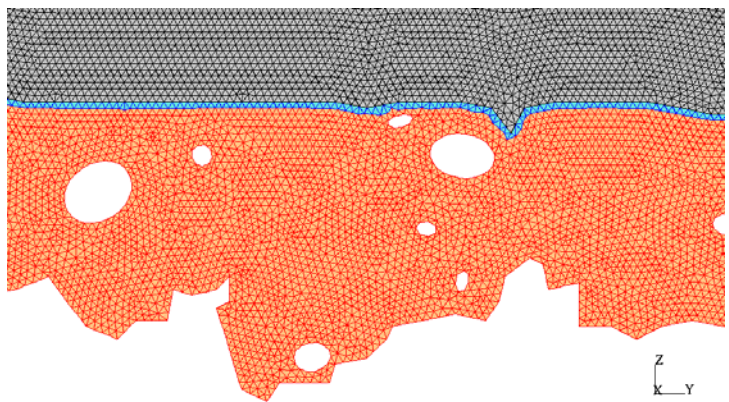
- Influence de la porosité
- Influence de la rugosité
- Résultats globaux

# 3.1 Principe de la modélisation par les maillages réalistes

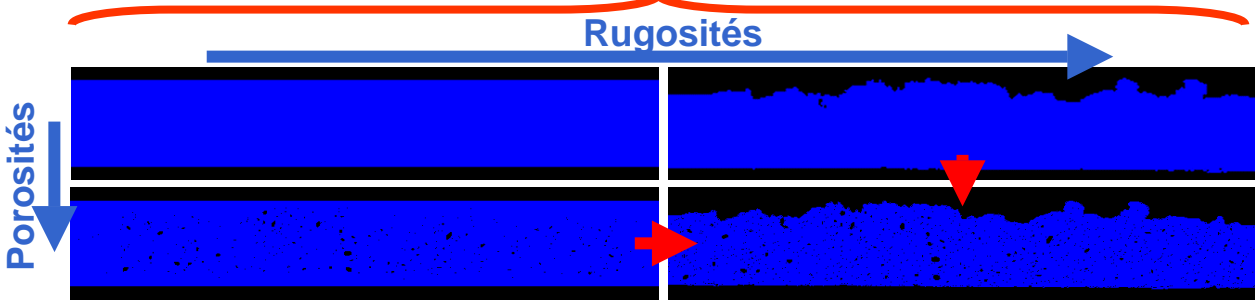
## Problème : modélisation du cuivre poreux/rugueux



- utilisation d'une loi de comportement spécifique (type P- $\alpha$ )  
*Arrigoni Michel, Thèse de l'université de Poitiers, 2004*
- modélisation macroscopique à l'aide de maillages réalistes



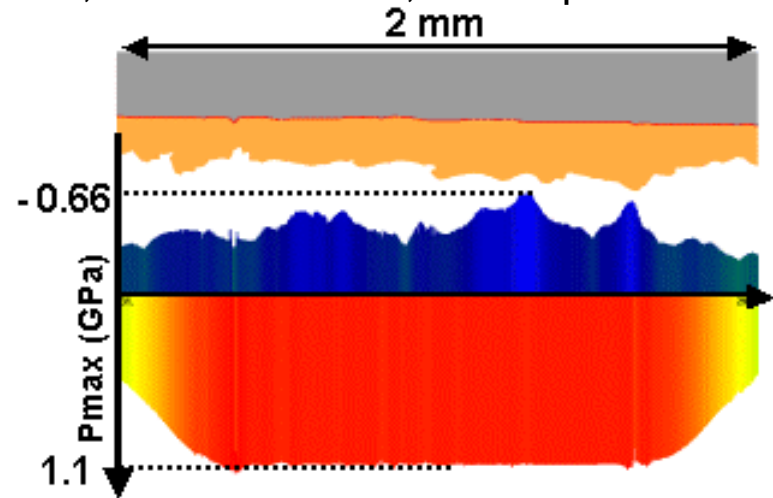
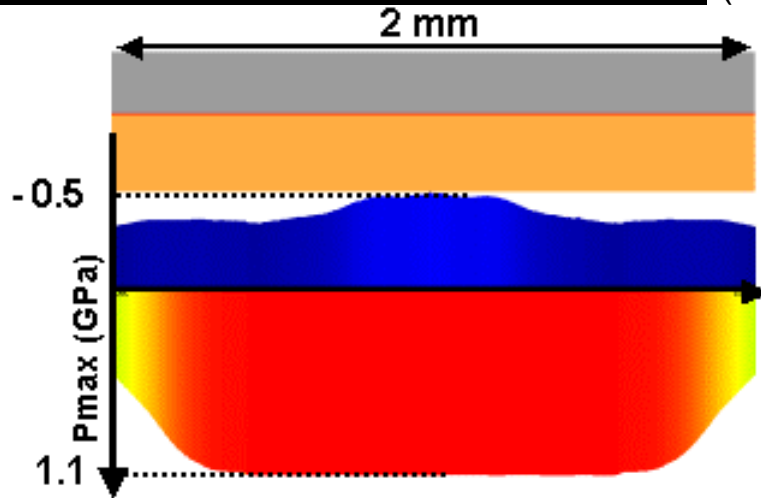
Affimage, Caract\_poro Castem 2000



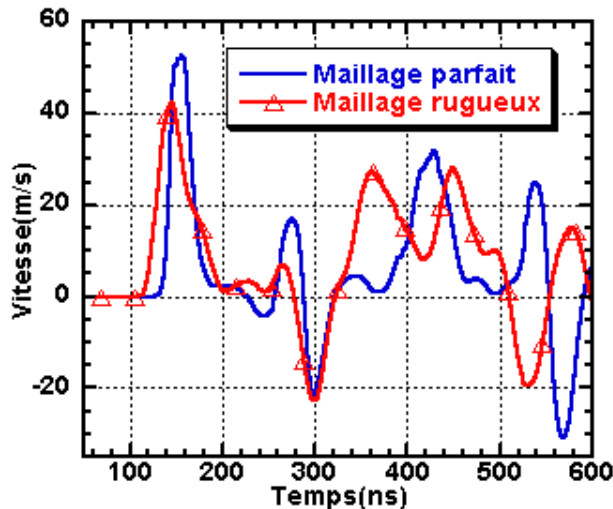
- Prise en compte de la **porosité** et de la **rugosité** (surface et interface)
- Taille des mailles : **5 à 7**  $\mu\text{m}$  environ (limitée par le mailleur)
- Interface = **2 à 3 mailles**

## 3.2 Influence de la rugosité de surface

Influence sur la pression à l'interface (chargement 1,0 GPa sur 2 mm, Al 500  $\mu\text{m}$  / Cu 300  $\mu\text{m}$ )



Influence sur le signal de vitesse de surface libre

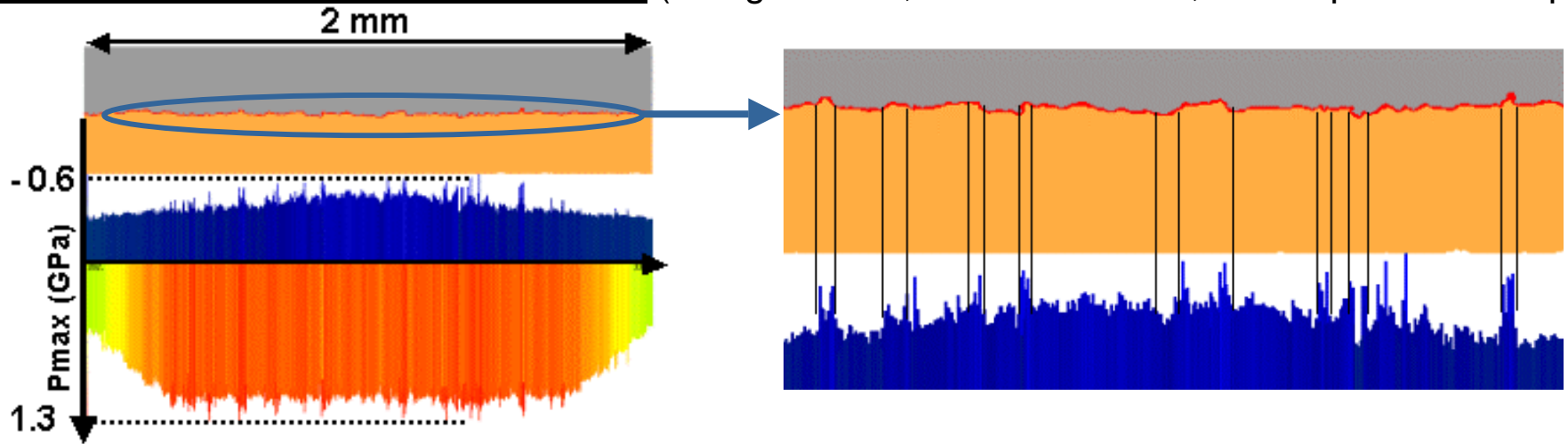


**Amplification** de la traction à l'interface / maillage lisse  
=> Rupture générée pour un chargement **inférieur** à celui nécessaire pour une cible lisse

Signal de vitesse **très influencé**  
+ influence du **positionnement** du point de mesure

# 3.3 Influence de la rugosité d'interface

Influence sur la pression à l'interface (chargement 1,0 GPa sur 2 mm, Al 500  $\mu\text{m}$  / Cu 300  $\mu\text{m}$ )



Présence de points de **concentration** de la traction à l'interface

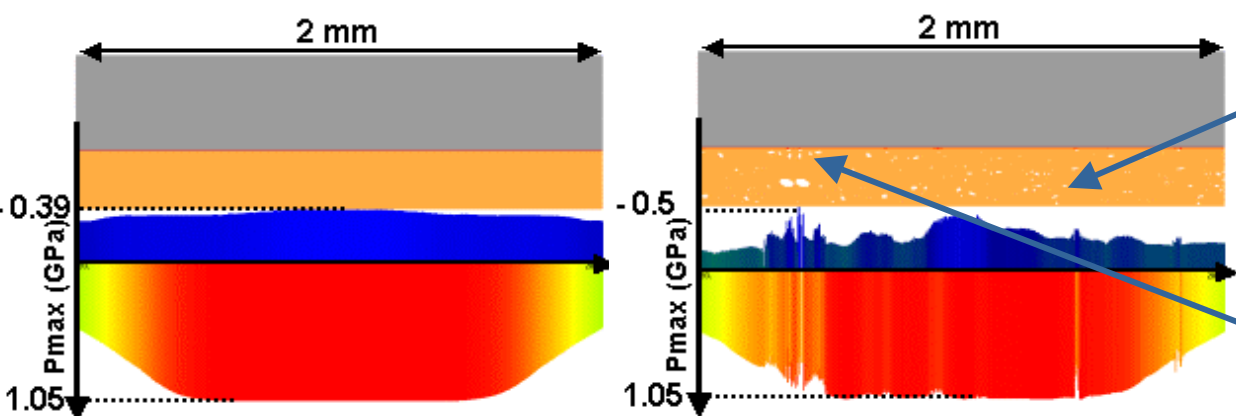
=> rupture de l'interface à ces points puis **propagation** de la rupture

Question : comment **arrêter** la propagation ?

# 3.4 Influence de la porosité

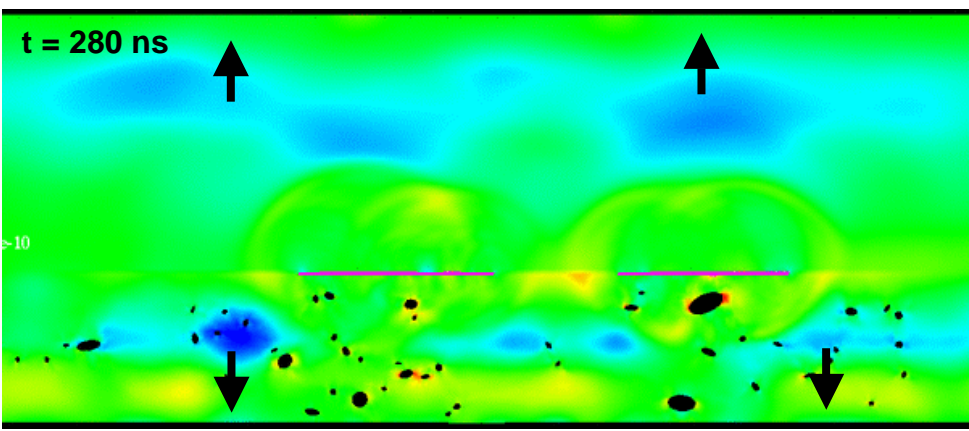
## Influence sur la pression à l'interface

(chargement 1,0 GPa sur 2 mm, Al 1 mm / Cu 300 μm)

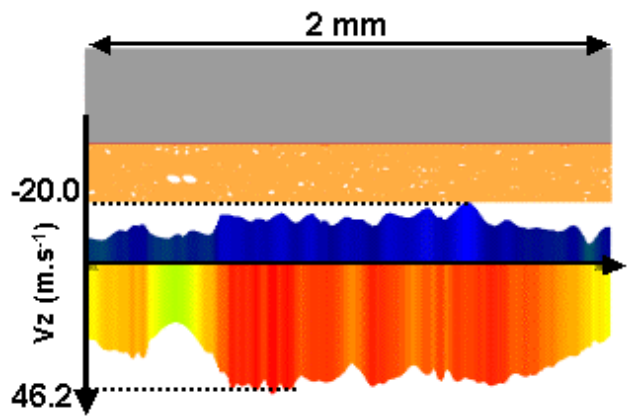


Effets **contradictoires** en fonction de la distance de la porosité à l'interface :

- porosités éloignées : **atténuation** de la traction à l'interface (> 50 μm environ)
- porosités proches : **augmentation** de la traction à l'interface par réflexion



## Influence sur la vitesse



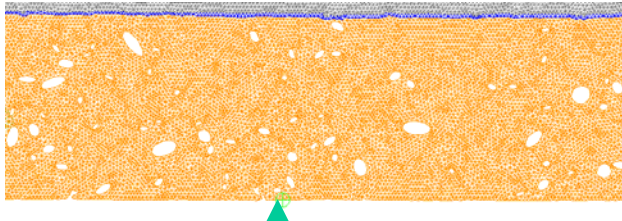
atténuation et variation latérale



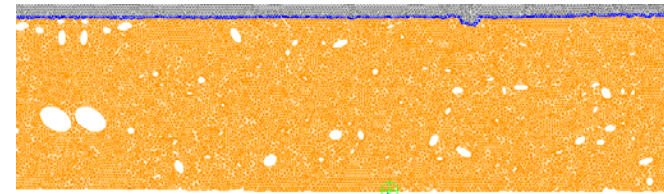
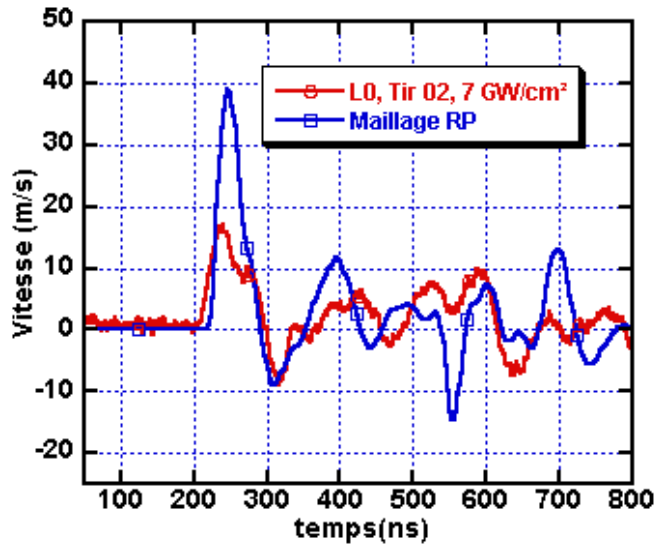
Difficulté de prise en compte de la porosité dans les signaux de vitesse

# 3.5 Comparaison expériences / simulations

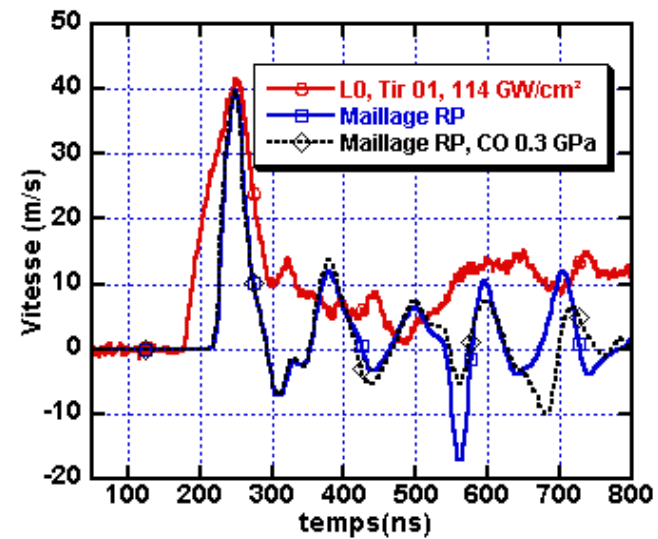
## Série L0



Sans rupture de l'interface



Avec rupture de l'interface



Complexité de la couche de cuivre



Modélisation numérique **complexe**

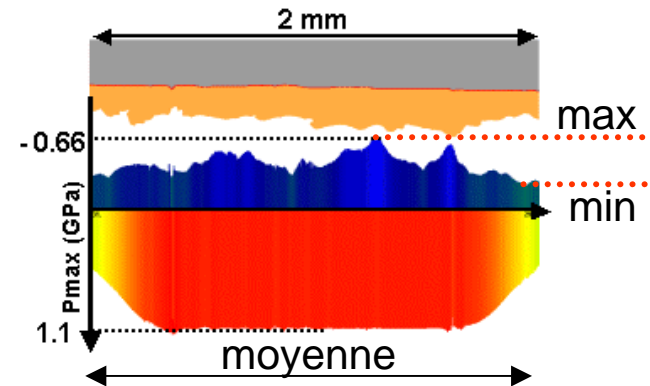
Analyse des signaux de vitesse  
expérimentaux difficile voire **impossible**

# 3.6 Analyse des résultats globaux

## Taux d'amplification globaux

(= traction maximale / traction maximale maillage lisse x 100)

| Taux d'amplification | Maximum | Minimum | Moyenne |
|----------------------|---------|---------|---------|
| Maillage rugueux     | 142 %   | 78 %    | 106 %   |
| Maillage poreux      | 116 %   | 57 %    | 88 %    |
| Maillage RP          | 177 %   | 25 %    | 82 %    |



Initiation de la traction avant le flux  
nécessaire pour une cible  
"parfaite"

Désaccord vitesses expérimentales /  
simulées



Impossibilité de donner les seuils  
**quantitatifs** pour ces matériaux  
complexes.

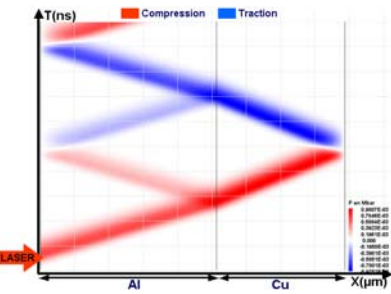
Influence de la rugosité :  
augmentation de la surface de contact  
accrochage mécanique



Utilisation d'un seuil en traction à  
l'interface **inadéquate**



# Plan de l'exposé

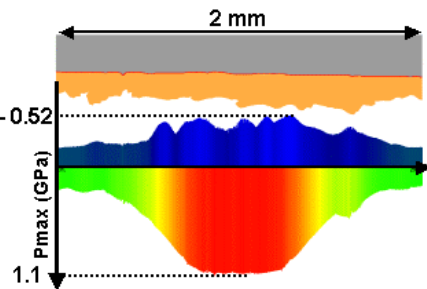
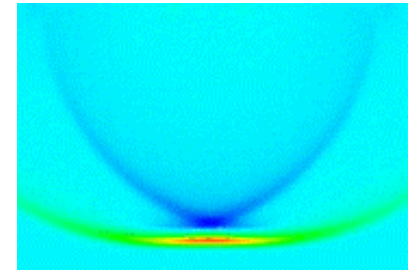


## 1. Les mécanismes 1D de création de traction à l'interface

- Classification 1D
- Optimisation 1D

## 2. Création de traction par les effets de bord

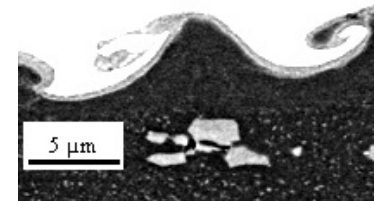
- Approche 2D : nouvelle source de traction
- Influence des effets de bord sur l'interface



## 3. Cibles complexes : maillages réalistes

- Influence de la porosité
- Influence de la rugosité
- Résultats globaux

## 4. Conclusion et Perspectives



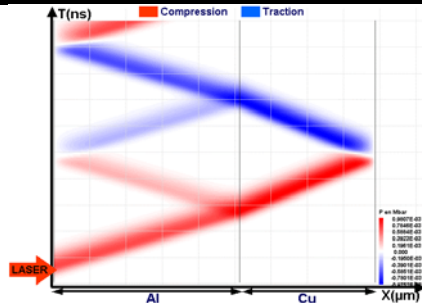
# Conclusion

## Démonstrateur LASAT opérationnel et utilisé

- procédure **validée** pour les seuils qualitatifs (cibles "complexes") et quantitatifs (cibles "simples")
- **outils** testés et validés (expérience, numériques)



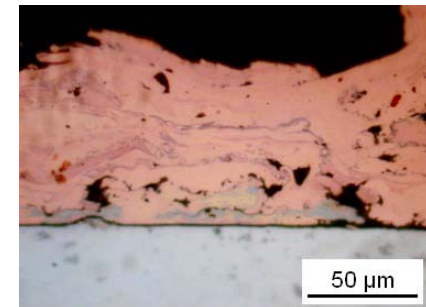
## Configurations de cibles :



- "**nouvelle**" méthode de création d'états de traction à l'interface (effets 2D)
- mise en évidence de configurations **optimisées** (synchronisation 1D ou 1D/2D)

## Cibles complexes :

- Étude qualitative **possible** sous certaines conditions (épaisseurs, matériaux)
- Étude quantitative difficile voire **impossible** sans adaptation du test



Pour un couple de matériaux donnés



- Choix de la configuration la plus adéquate
- Connaissance de l'état de traction maximal à l'interface

# Perspectives

---

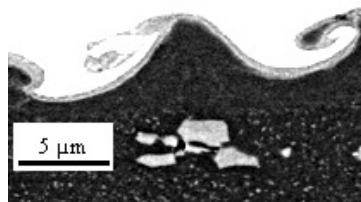
## Ce qu'il reste à faire :

- **Automatisation** complète du démonstrateur (utilisation industrielle)
- Démonstration complète de l'influence de la **synchronisation** des ondes (1D et 1D/2D) sur les seuils

## Ce qu'il faut améliorer :

- Utilisation de lois matériaux et d'endommagement plus **complètes** (SHYLAC et RADIOSS)
- **Combinaison** maillages "réalistes" et lois de comportement poreux dans RADIOSS
- Cibles complexes :
  - utilisation de maillages plus **fins**
  - prise en compte des défauts **macroscopiques** restant (fissures, inhomogénéités du matériau)
  - modélisation de la rupture dynamique de l'**interface** par un critère adapté

Question : où s'arrêter ?



Épaisseur des intermétalliques à l'interface < 1 μm



# 2.1 Approche analytique : classement des configurations

## Paramètres analytiques :

$Z_i$  = impédance acoustique du matériau  $i$   
 = vitesse du son  $\times$  masse volumique initiale  
 =  $C_0 \rho_0$

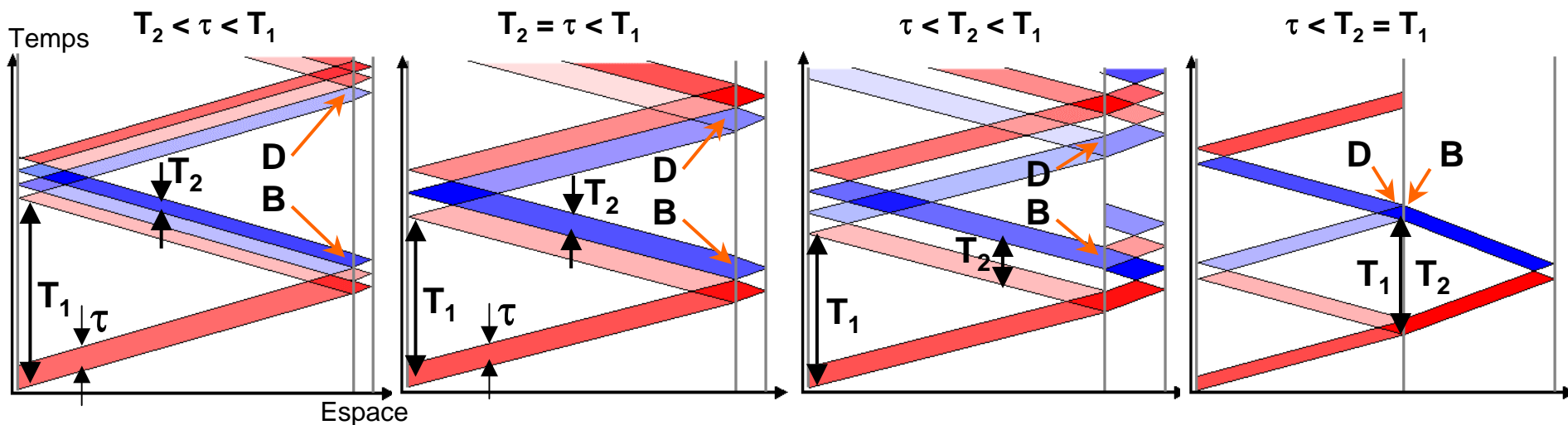
$T_i$  = temps d'aller et retour dans le matériau  $i$   
 =  $2 \times$  épaisseur du matériau / vitesse du son  
 =  $2 \times e_{p_i} / C_{0i}$

$Z = Z_1 / Z_2$

$\tau$  = durée de l'impulsion à mi-hauteur

$P_0$  = Pression maximale du chargement

## Classification des configurations en fonction des paramètres temporels :



Temps d'application de la traction à l'interface =  $T_2$   
 => Décohésion souvent **impossible**

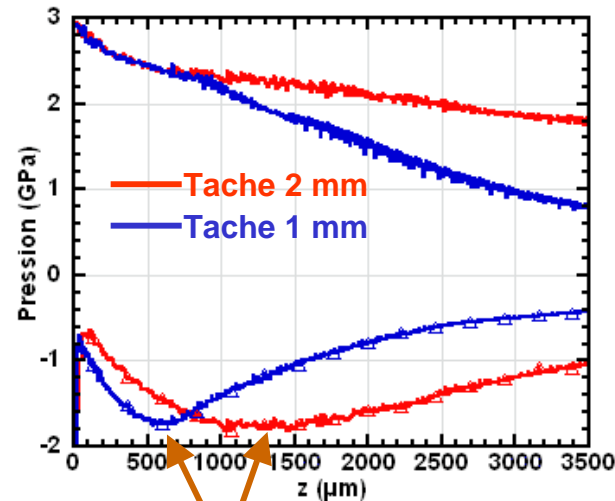
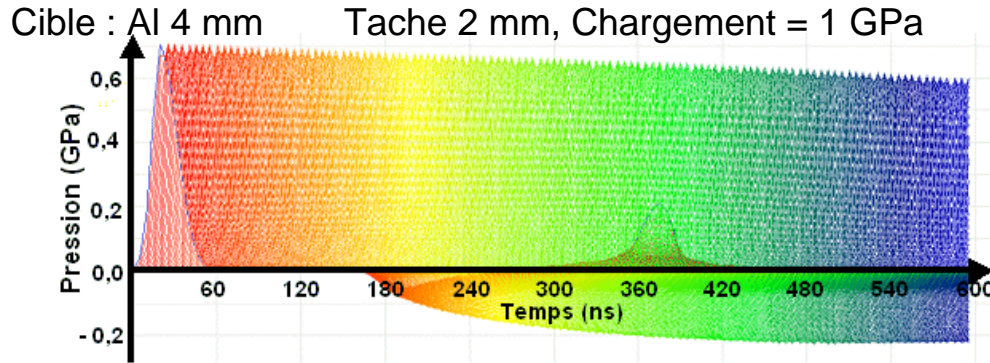
Configuration **E. Auroux** :  
 Nécessité de régler  $\tau = T_2$   
 Risque d'endommagement **faible**

Cas le plus **général**  
 Risque d'**endommagement** de la couche avant l'interface

Nouvelle configuration optimisée : **maximum** de traction à l'interface pour  $Z_1 < Z_2$

## 2.6 Suite des effets de bords

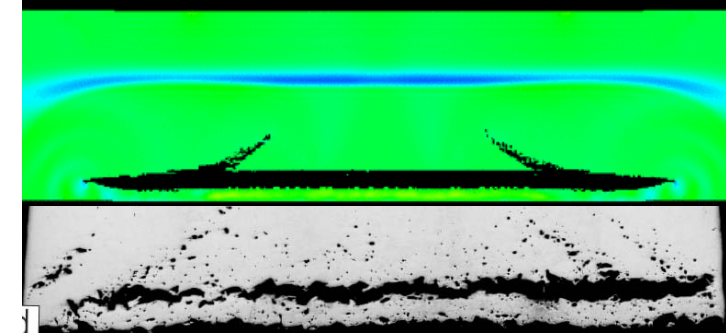
Évolution de la pression en fonction du temps dans l'épaisseur de la cible (couleur = épaisseur)



$$\sigma_{2D \max} (1\text{mm}) \approx \sigma_{2D \max} (2\text{mm})$$

$\sigma_{2D}$  (2mm) reste important plus longtemps : moins d'atténuation que pour la tache de 1 mm

Endommagement sur une couche de Cu



HIXSON R. S., GRAY G. T., RIGG P. A. et al, AIP Conference Proceedings Vol 706(1) pp. 469-472. July 20, 2004

Maximum de traction par les effets de bords lorsqu'ils rattrapent l'onde principale

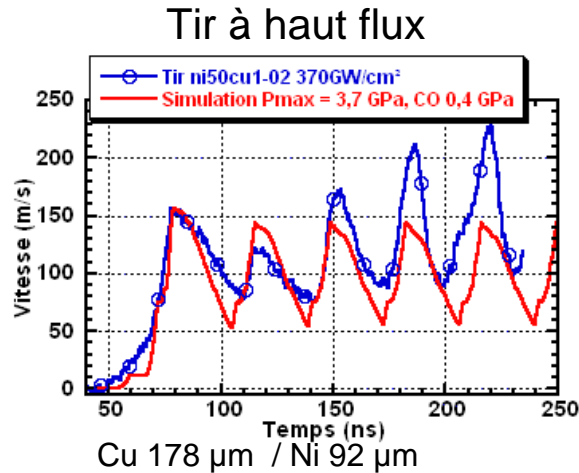
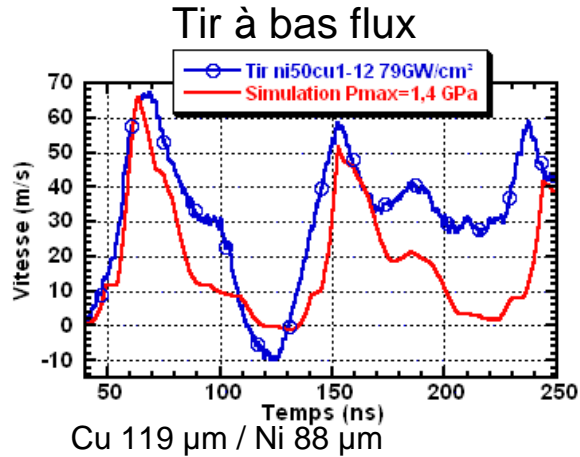
Position du maximum dépend de la dimension de la tache de chargement



Possibilité de **rompre l'interface** par les effets de bords

**Choix** de l'épaisseur du substrat le plus adéquat pour utiliser ces effets

# 3.3 Résultats sur les cibles Cu/Ni

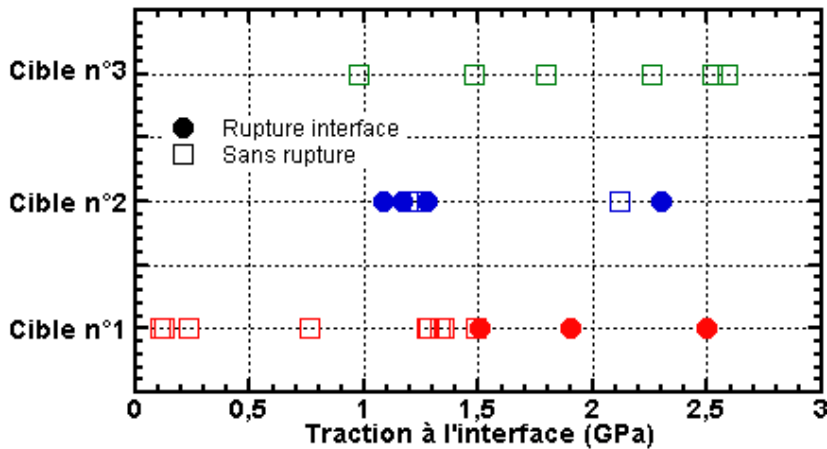


Expérience et simulations concordent

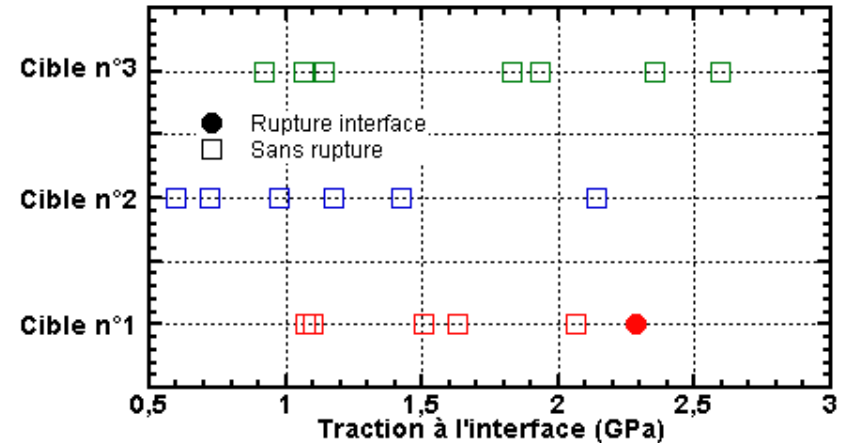


Calculs des seuils en niveau de traction à l'interface possibles

Tirs côtés cuivre



Tirs côtés nickel

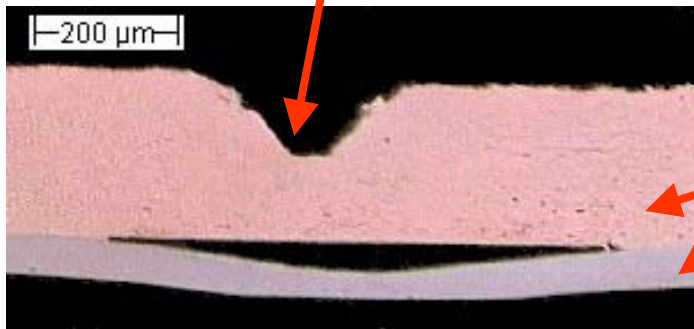


Pas d'accord entre les seuils en fonction du côté où a été réalisé le tir...

## 3.4 Commentaires sur les résultats Cu/Ni

Interaction laser / matière :

Présence sur certains tirs d'un mode relaxé du laser :  
génère une seconde impulsion laser beaucoup plus énergétique



Interaction laser matière Cu / Ni ?

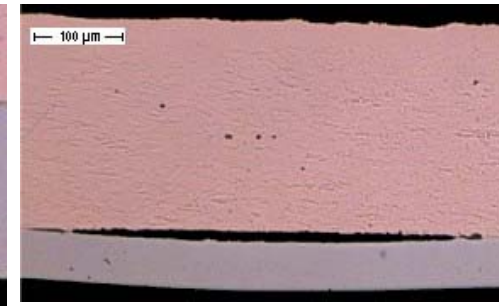
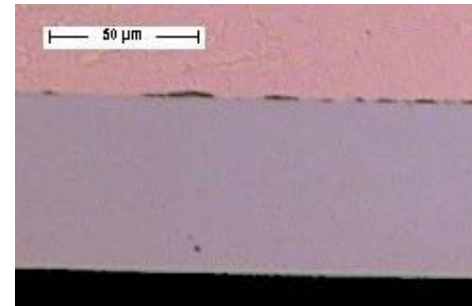
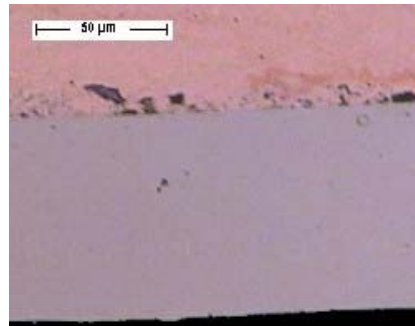
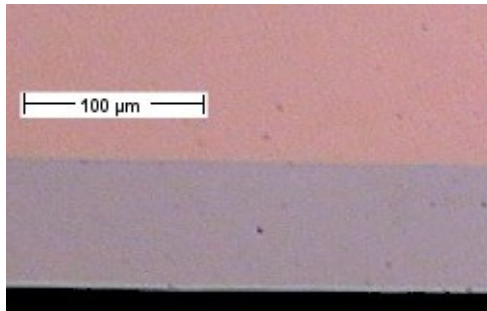
Modélisation de la rupture de l'interface :

108 GW/cm<sup>2</sup>

227 GW/cm<sup>2</sup>

249 GW/cm<sup>2</sup>

276 GW/cm<sup>2</sup>

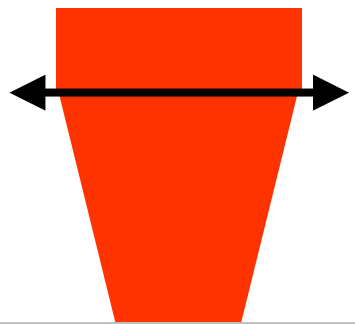


Mécanisme de type ductile : Tuler Butcher ou Cut-Off non indiqué...



# 1.1 Dispositif expérimental : démonstrateur LASAT

Laser impulsionnel  
1064 nm

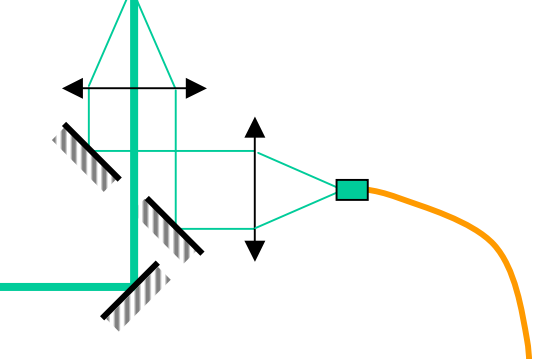


3 configurations :  
- impact de plaque  
- confiné  
- **directe**

Substrat  
Revêtement



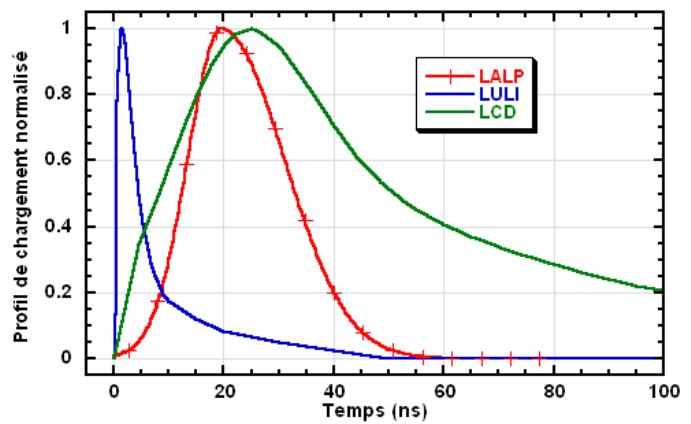
Laser continu  
532 nm



VISAR  
(Velocity Interferometer for Any Reflector)

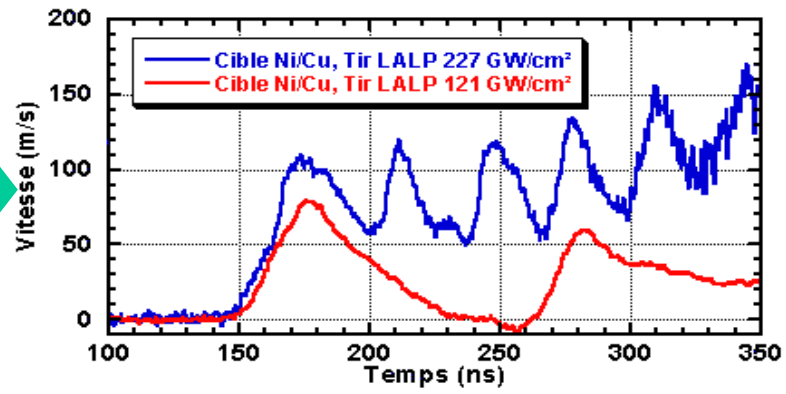


+ 3 Lasers (LALP, LULI, LCD)



Conditions initiales  
(chargement)  
Réponse en vitesse  
de la cible

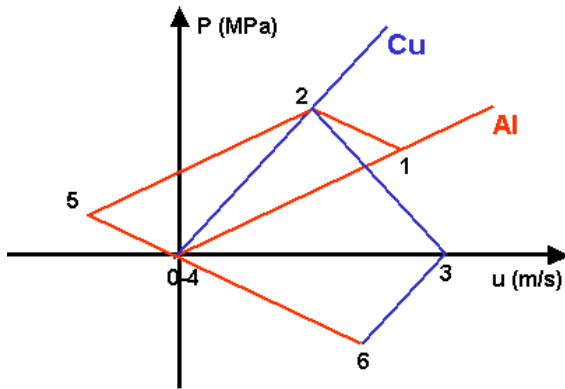
Seules observables  
accessibles



# 1.2 Codes numériques



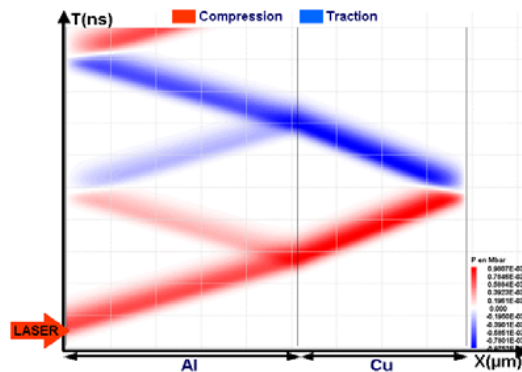
## Approche analytique 1D HUGO + Maple



- Rapide, donne des formules générales
- Pas d'atténuation, trop d'hypothèses

**Compréhension et Généralisations**

## Simulations 1D SHYLAC



- Rapide, ouvert, utilisable en module externe
- 1D, peu de lois de comportement

**Développement et recherche de paramètres**

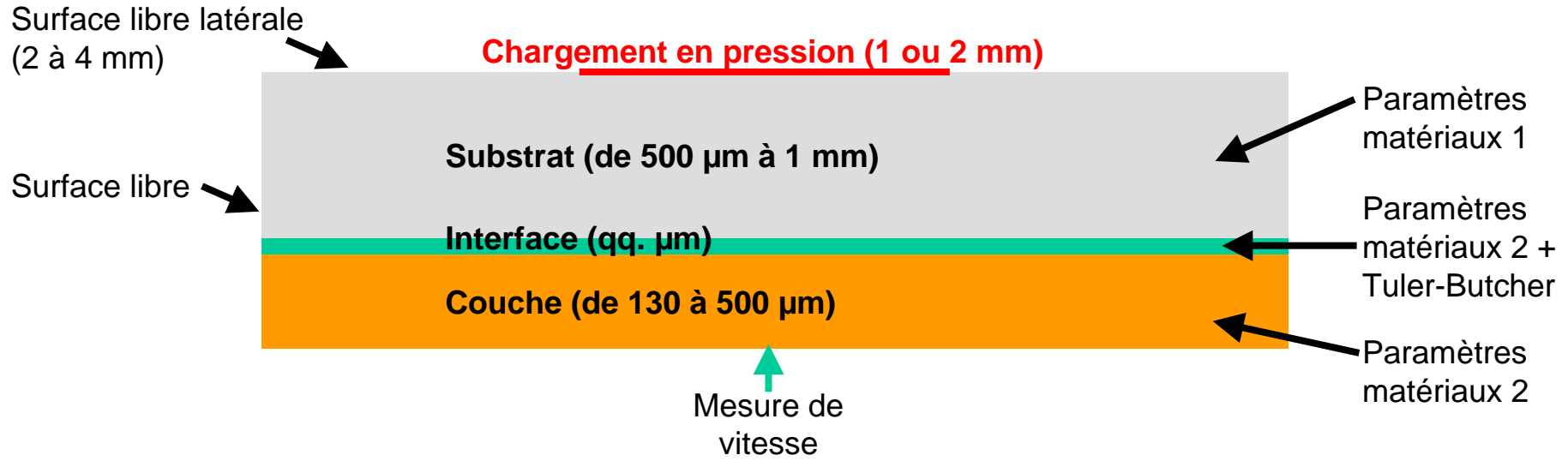
## Simulations 2D/3D RADIOSS



- 2D, 3D, possibilités de créer des lois utilisateurs
- Code industriel, influence du maillage

**Finitions, effets complexes**

# 1.3 Modélisation des cibles



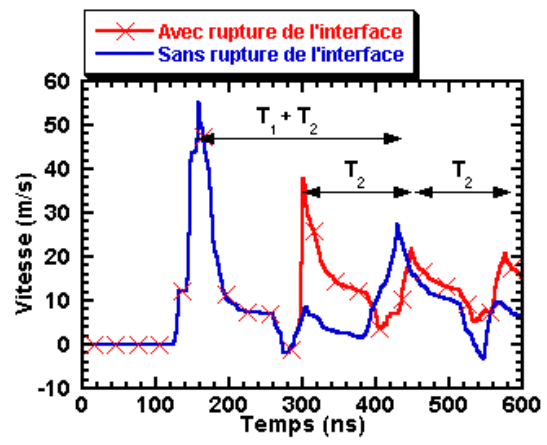
## Paramètres matériaux :

- Loi élasto-plastique parfaite (SHYLAC)
- Loi Johnson Cook- Hydro (RADIOSS)
- + modèle d'endommagement de Kanel

## Tuler Butcher :

si  $\sigma > \sigma_{\text{seuil}}$  alors :  $I = \int (\sigma - \sigma_{\text{seuil}})^a dt$

Rupture lorsque  $I > K$

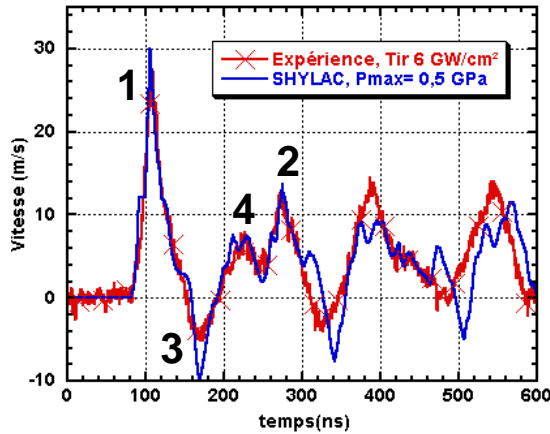


Al 400 µm /  
Cu 300 µm

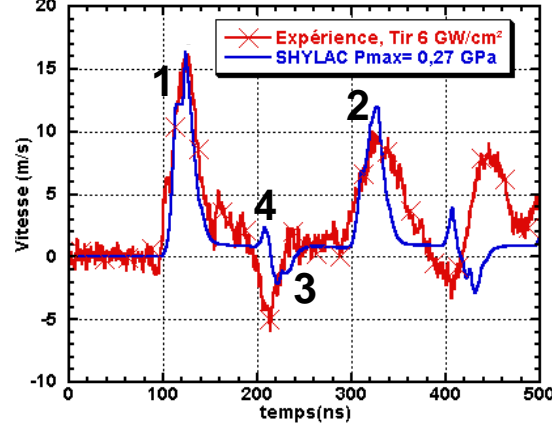
## 2.4 Confirmation expérimentale de l'optimisation 1D

Idée : comparer les seuils en flux entre une cible  $T_1 = T_2$  et une cible  $T_1 < T_2$

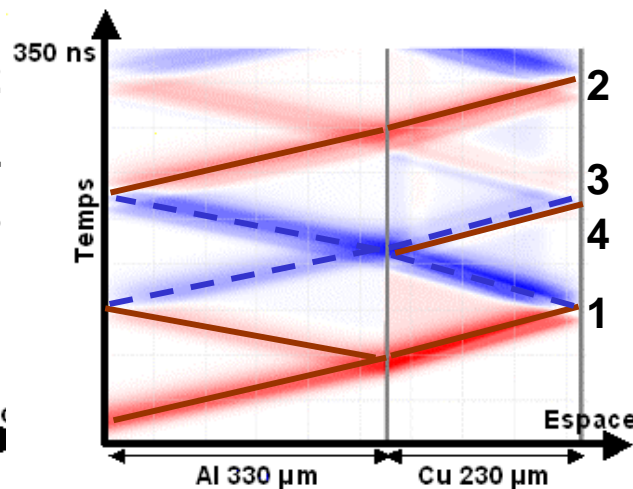
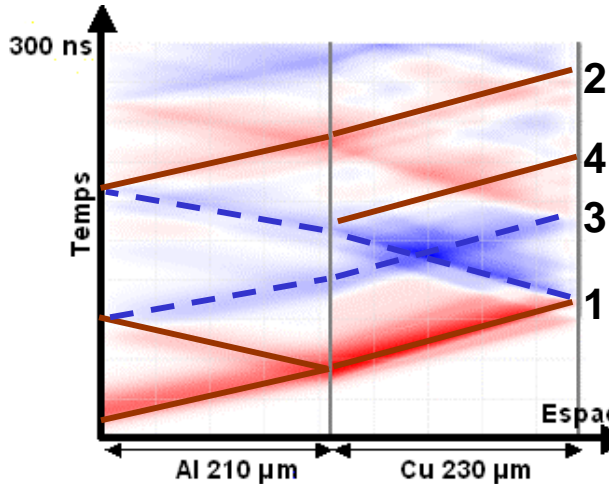
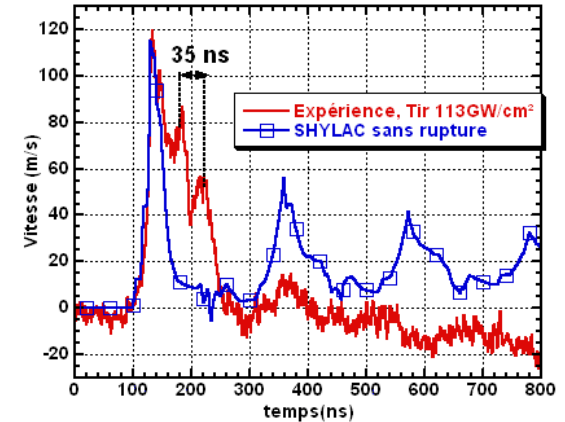
$T_1 < T_2$  (Al 210  $\mu\text{m}$  / Cu 230 $\mu\text{m}$ )



$T_1 = T_2$  (Al 330  $\mu\text{m}$  / Cu 230 $\mu\text{m}$ )



Mais...



Vitesse typique d'un endommagement de la couche de cuivre à 65 - 70  $\mu\text{m}$  de la surface libre (AR de 35 ns)

Aucune mesure de seuil possible...

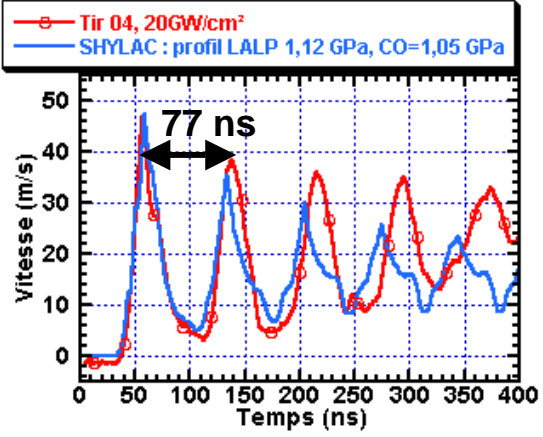
Très bon accord expériences / simulations avec du cuivre électrolytique

Synchronisation des ondes démontrée par le signal de vitesse (quasi-absence d'aller et retour dans le cuivre)

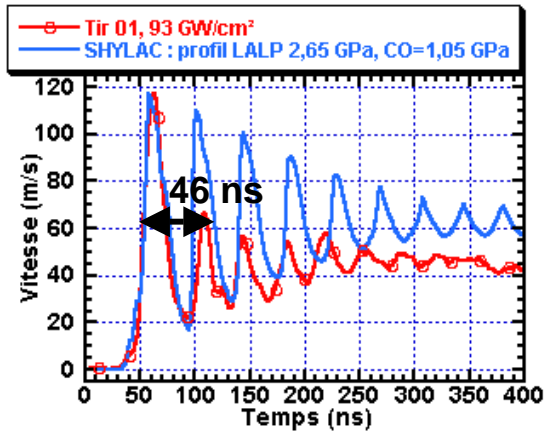
# 3.1 Résultats sur les cibles Cu/Cr

Ex : cible Cr 110 μm, Cu 85 μm

Tir à bas flux



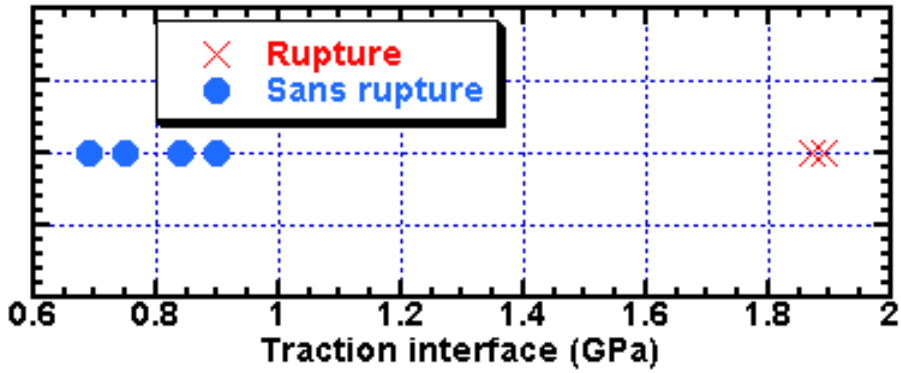
Tir à haut flux



$T_1 = 43 \text{ ns}$   
 $T_2 = 42 \text{ ns}$   
 $T_1 + T_2 = 85 \text{ ns}$

Haut flux = rupture de l'interface

Accord expérience / simulation  
 => calcul de la contrainte à l'interface



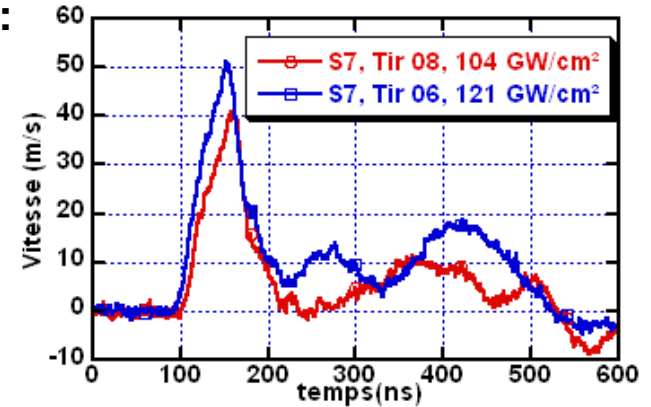
L'utilisation des simulations avec rupture et la recherche du meilleur accord sur le moment de la rupture donne un seuil à :  $1,2 \pm 0,2 \text{ GPa}$

Seuil obtenu à l'aide des simulations sans rupture de l'interface

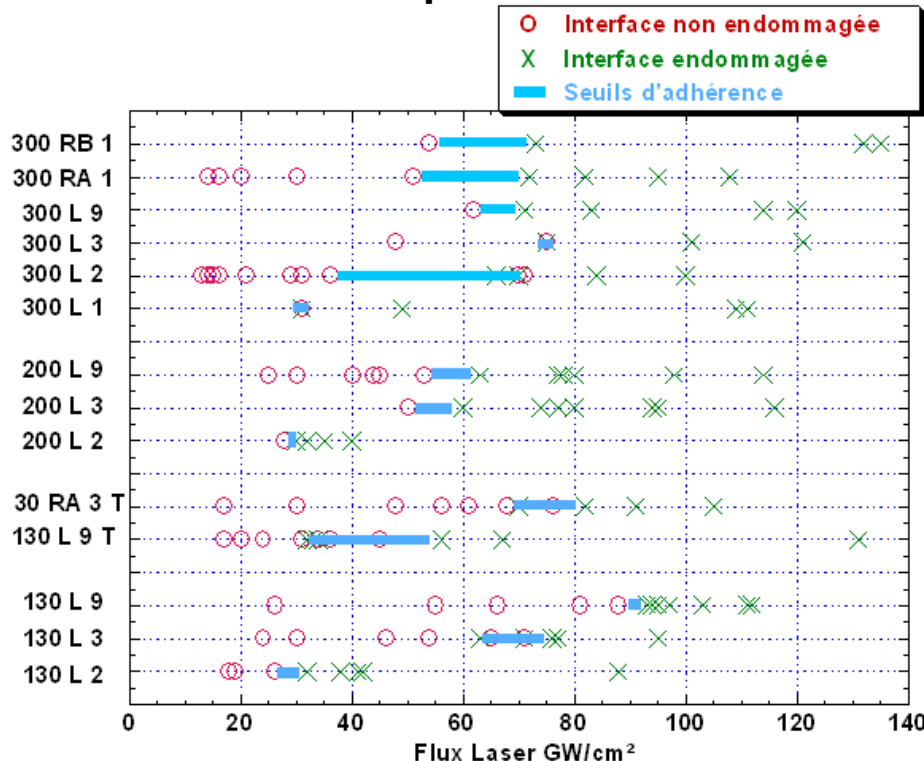
# 3.2 Cibles Al / Cu

## Cibles complexes Al / Cu : simulations 1D / expériences :

- Quelques signaux pouvant être simulés
- Pour beaucoup ne correspondant à aucunes simulations



## Utilisation des seuil qualitatifs en flux laser



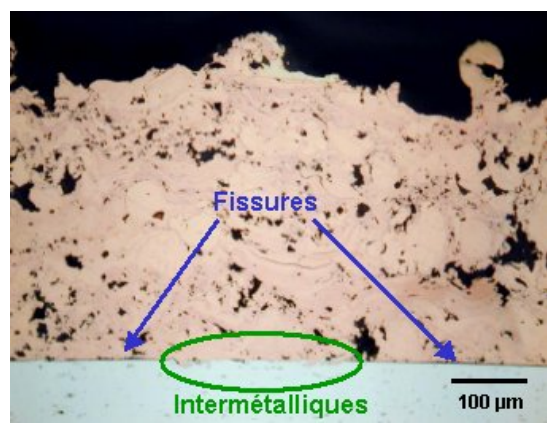
Influence de la **métallurgie**  
(température de préchauffage du substrat)

Influence de la **rugosité** de l'interface  
Al / Cu

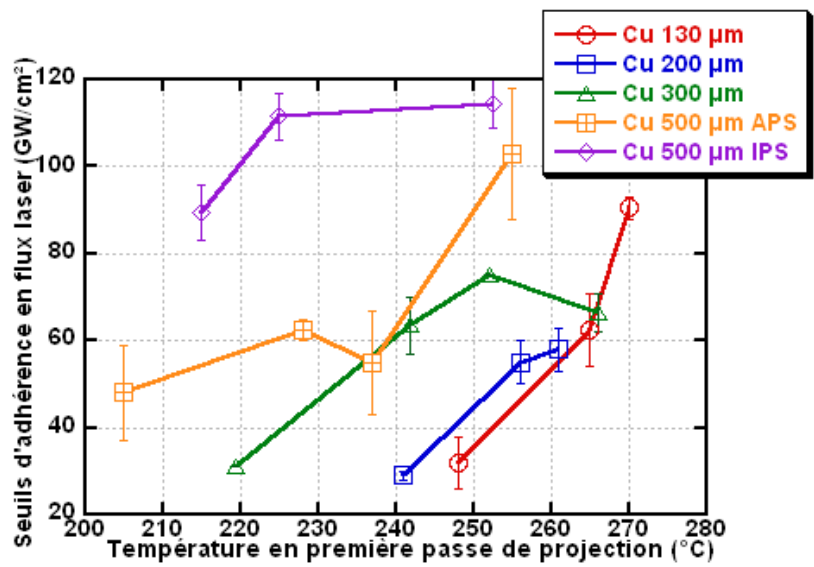
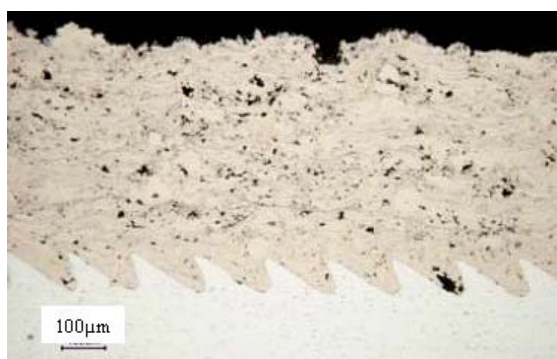
# 3.4 Étude qualitative de l'interface Al / Cu

Influence de la métallurgie de l'interface

Influence de la morphologie

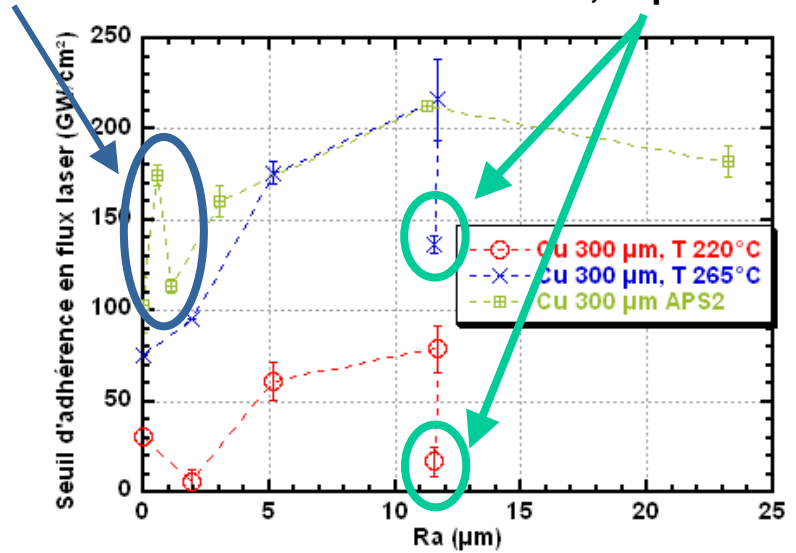


Barradas Sophie, "Etude par l'essai de choc laser des interfaces Cu/Al Et Cu/Cu", thèse de l'École des Mines de Paris 2004



Attaqués chimiquement : influence des intermétalliques

Ra de 11 μm mais Rt de 72,91 μm



Influence **nette** de la rugosité

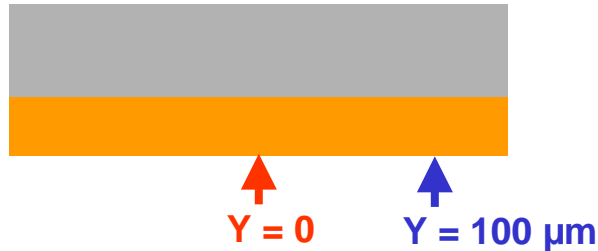


Valeur et forme de rugosité **optimale** à déterminer

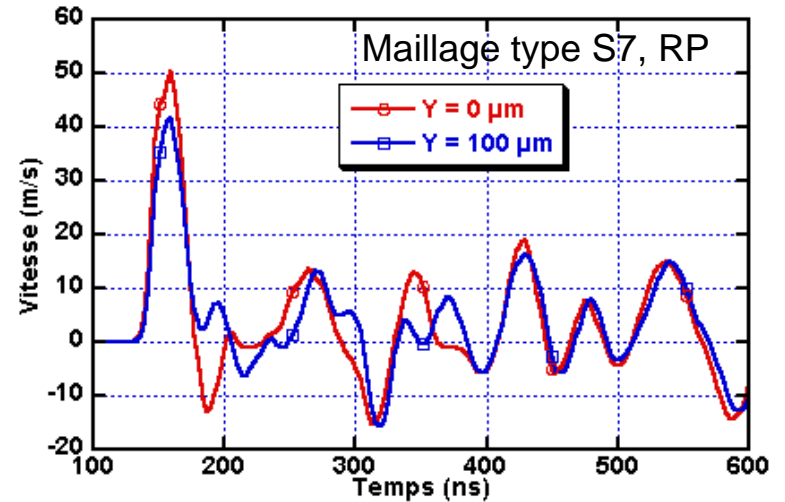
Température avant projection = paramètre **sensible** pour la tenue de l'interface

# Influence du pointage

## Influence de l'erreur de "pointage" du spot de mesure de la vitesse



Très grande sensibilité des signaux aux "défauts" de la couche





## 3.7 Points faibles de la modélisation

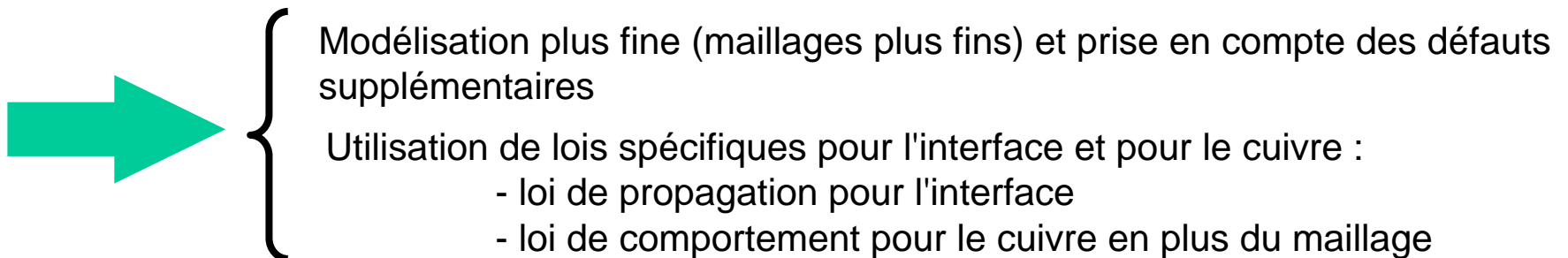
---

### Modélisation de l'interface :

- Modélisation de la propagation de la fissure => utilisation d'un critère **spécifique**
- **Dimension de l'interface** : environ 5-7  $\mu\text{m}$  pour le maillage contre quelques nanomètres pour une interface lisse et  $<1 \mu\text{m}$  pour les zones avec intermétalliques
- Absence de prise en compte des fissures, pollutions et intermétalliques déjà présents à l'interface + variation de l'adhérence le long de l'interface  
=> modélisation **plus fine** (donc plus complexe)

### Modélisation du cuivre poreux :

- **Simplifications** par la méthode d'analyse de la structure de la couche de cuivre (suppression de porosités, modélisation des porosités par des ellipses)
- **Absence** de prise en compte des infondus, des fissures inter-splat, de la couche d'oxydation et des différences mécaniques entre les différentes parties du matériau
- Utilisation de simulations **2D planes** : le matériau est 3D



# Influence de la répartition d'énergie

