



# MODELISATION PHYSIQUE DE LA DECOUPE DE METAUX PAR LASER



Sous la direction de Rémy Fabbro

Présentée le jeudi 24 avril 2003 par Cédric Mas



# **PLAN DE LA PRESENTATION**

**Introduction au processus de découpe, état de l'art**

**Partie I : THEORIE DE LA DECOUPE LASER**

**Mise en place du modèle physico-mathématique de découpe laser**

**Partie II : SIMULATION**

**Méthode de résolution numérique et présentation des résultats de simulation**

**Partie III : EXPERIMENTATIONS ET COMPARAISONS**

**Validation du modèle et mesures d'absorptivité**

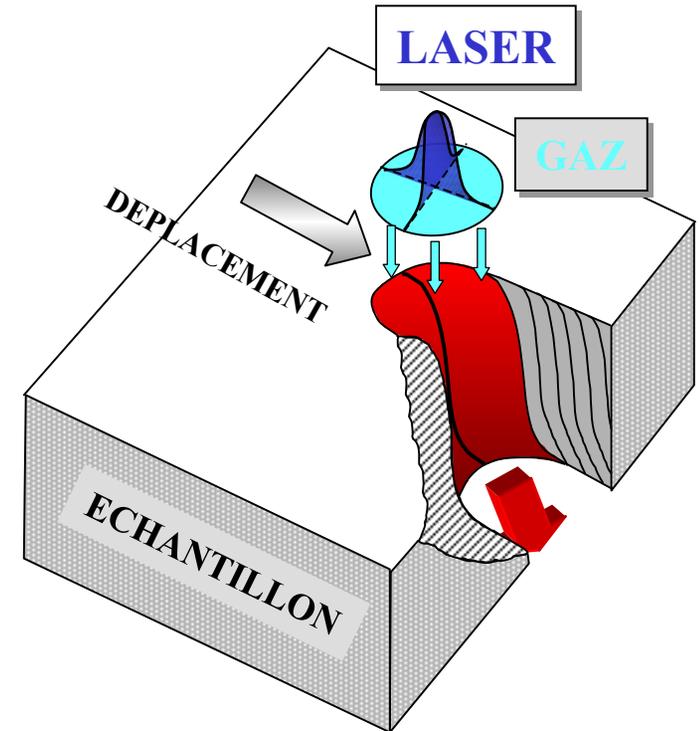
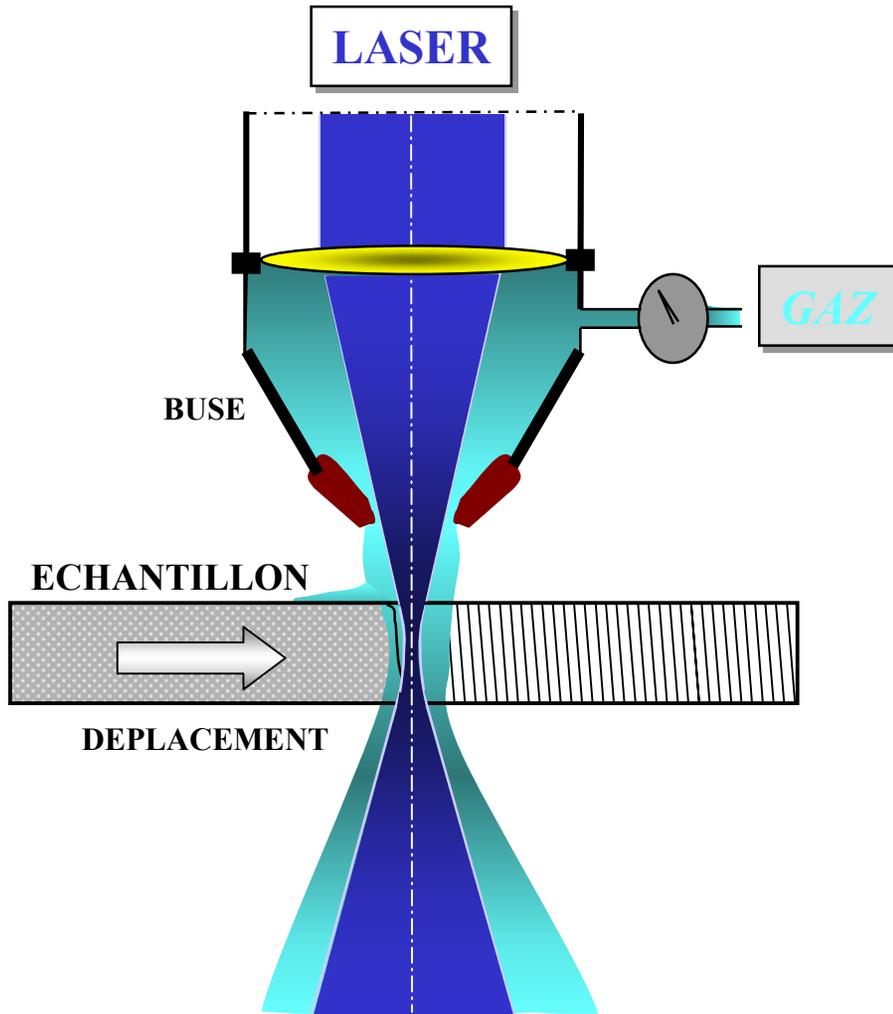
**Partie IV : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

# → Introduction au procédé de découpe de métaux par laser

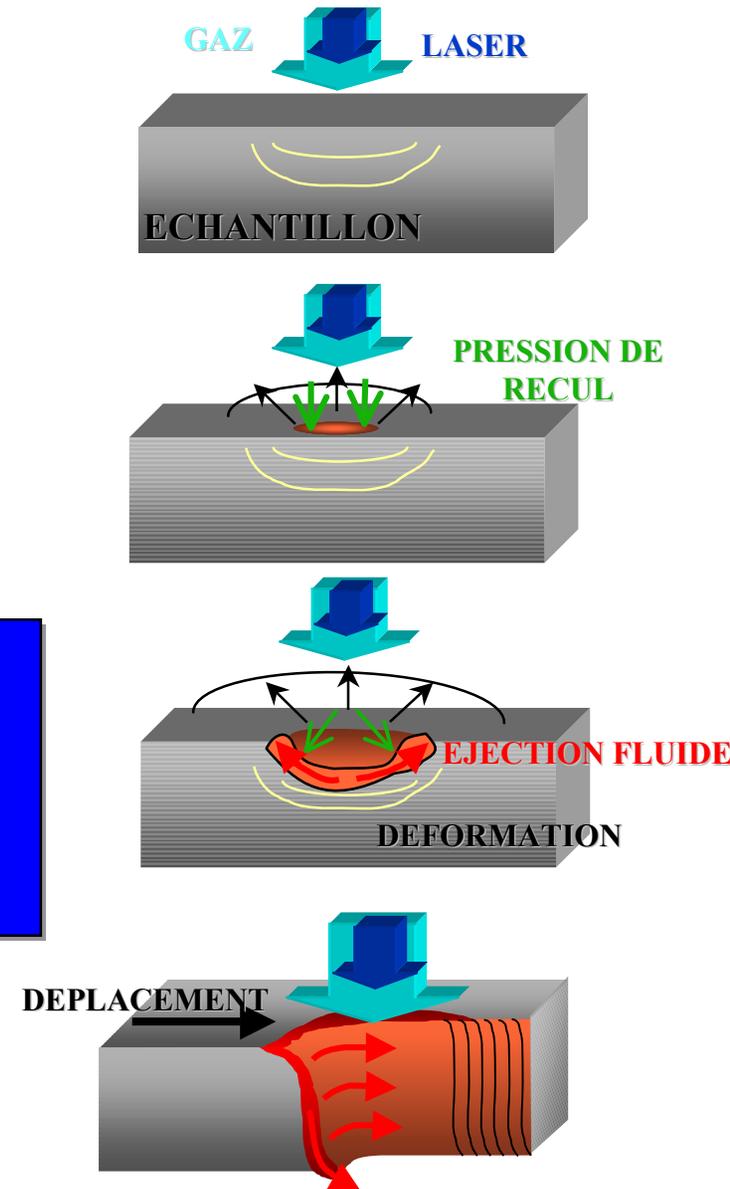
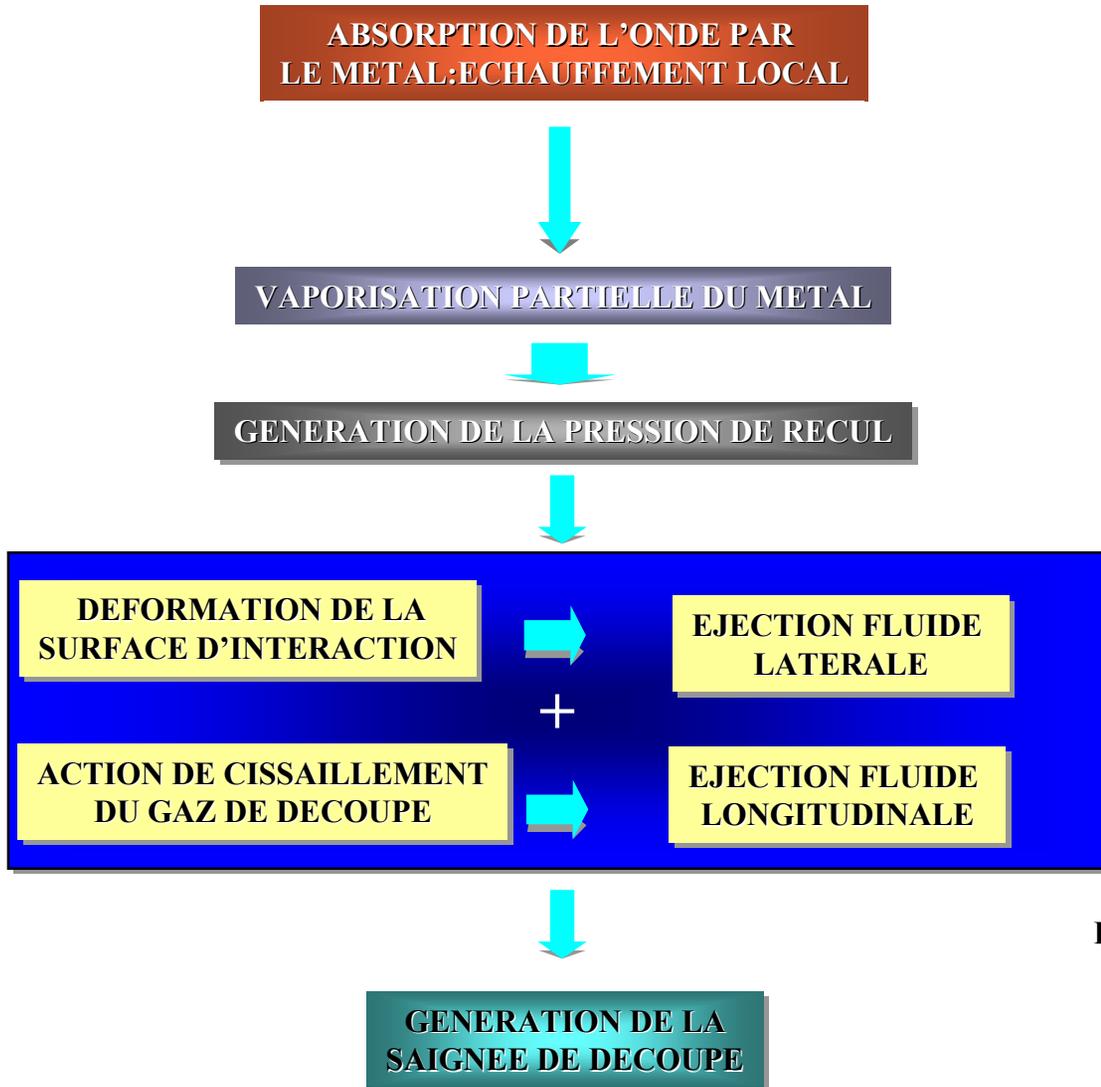
1-ECHANTILLON

2-LASER

3-GAZ D'ASSISTANCE

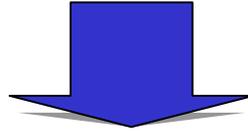


# → Physique de la découpe laser



## → Évolution des idées en découpe laser : état de l'art

**Invention de la découpe de métaux par laser : 1967 au TWI**

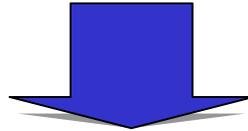


### **MODELES DE DECOUPE GLOBAUX**

**1<sup>er</sup> modèle auto-consistant de découpe laser : Schulz 1989 → pas de validation expérimentale**

**Modèle global simplifié : Kaplan 1996 → trop simplifié**

**Modèle stationnaire 3D : Petring 1995**



**Aucun logiciel disponible**

**Approche personnelle**

$$v = \left( \frac{m}{2\pi k_B} \right)^{3/2} \frac{p_0}{\rho \sqrt{\Gamma_0}} \exp \left[ \frac{\Delta H_0}{k_B \Gamma_0} \left( 1 - \frac{\Gamma_0}{\Gamma} \right) \right] (1 - \beta_0)$$

$$P_{\text{out}} = \left\{ \frac{2P_0}{\pi w^2(z)} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left( -2 \frac{x^2 + y^2}{w^2(z)} \right) dx dy \right] \right\}_{\text{out}}$$

$$v = - \frac{2\eta r v_0^2}{\rho (\kappa \ln \Lambda)} + \sqrt{\left( \frac{\eta r v_0^2}{\rho (\kappa \ln \Lambda)} \right)^2 + \frac{2}{\rho} \Delta p|_{r \rightarrow r_0}}$$

$$v_{\text{in}} = \frac{f}{32\eta} \frac{\rho_0}{v_0} \ln(\Lambda) \rho_0 v_0^2$$

$$v_{\text{in}} = \frac{f}{32\eta} \frac{\kappa}{v_0} \ln(\Lambda) \rho_0 v_0^2$$

$$\sum_{\text{ext}} \int_{\text{ext}} \vec{q} \cdot \vec{n} ds = 0 \Leftrightarrow \sum_{\text{ext}} \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{\text{ext}} = \sum_{\text{ext}} \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{\text{ext}}$$

$$r_{\text{in}}^{\text{min}} = \frac{\sigma_0 + (\Gamma_0 - \Gamma_0) \frac{d\sigma}{d\Gamma}}{p_0 \left\{ 1 + \frac{(1 + \beta_0)}{2} \exp \left[ \frac{\Delta H_0}{k_B \Gamma_0} \left( 1 - \frac{\Gamma_0}{\Gamma} \right) \right] \right\}}$$

$$\bar{\delta} = \frac{\kappa}{v_0} \ln \Lambda$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\omega}{\omega + \Gamma^2} &= \varepsilon \\ \Im m(n^2) = 2nk &= \frac{\alpha \Gamma}{\omega + \Gamma^2} = \varepsilon \end{aligned} \right.$$

$$\rho v_0 = \left( \frac{m}{2\pi k_B} \right)^{3/2} \left[ \frac{p_{\text{out}}(\Gamma_0)}{\sqrt{\Gamma_0}} - \beta_0 \frac{p_{\text{out}}(\Gamma_0)}{\sqrt{\Gamma_0}} \right]$$

$$\left\{ \begin{aligned} \bigcup_{i=1}^n \Omega_i &= \Omega \\ \bigcap_{i=1}^n \Omega_i &= 0 \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Gamma(\xi) - \frac{I_{\text{out}}}{v \rho C_0} \left[ \exp \left( \frac{v \xi}{\kappa} \right) - \exp \left( -\frac{v \xi}{\kappa} \right) \right] + \Gamma_0 \\ \Gamma(\xi) - (\Gamma_0 - \Gamma) \exp \left( \frac{v (\xi + \bar{\delta})}{\kappa} \right) + \Gamma_0 \end{aligned} \right.$$

$$w(z) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{z + p p f}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2}$$

# Partie I THEORIE DE LA DECOUPE LASER

$$(M_{\text{ext}})_{\text{ext}} = \frac{r+1}{r-1} \left[ 1 - \frac{1}{M_0} \left( \frac{2}{r+1} \right)^{r+1} \right] \left( r M_0 - \frac{r}{2} \right)$$

$$\Leftrightarrow \sum_{\text{ext}} \left( \frac{dm}{dt} \right)_{\text{ext}} = \sum_{\text{ext}} \left( \frac{dm}{dt} \right)_{\text{ext}}$$

$$P_{\text{out}} = m \int \int \left[ \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u^2 f_1(u, v, w) du dv}_{\text{processus d'évaporation}} + \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u^2 \beta_0 f_2(u, v, w) du dv}_{\text{processus de rétrodiffusion}} \right] dx dy$$

$$\frac{K}{\sigma} = \frac{\pi}{3} \left( \frac{k_B}{e} \right)^2 \Gamma$$

$$I = \frac{2P_{\text{out}}}{\pi w^2(z)} \exp \left( -\frac{2x^2}{w^2(z)} \right) \left[ \frac{1}{2\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left( -\frac{2y^2}{w^2(z)} \right) dy \right]$$

$$\vec{v}_{\text{ext}}(\alpha_{\text{ext}}) = \vec{0} \Leftrightarrow v_{\text{ext}}(\alpha_{\text{ext}}) = v_0 \cos \alpha_{\text{ext}}$$

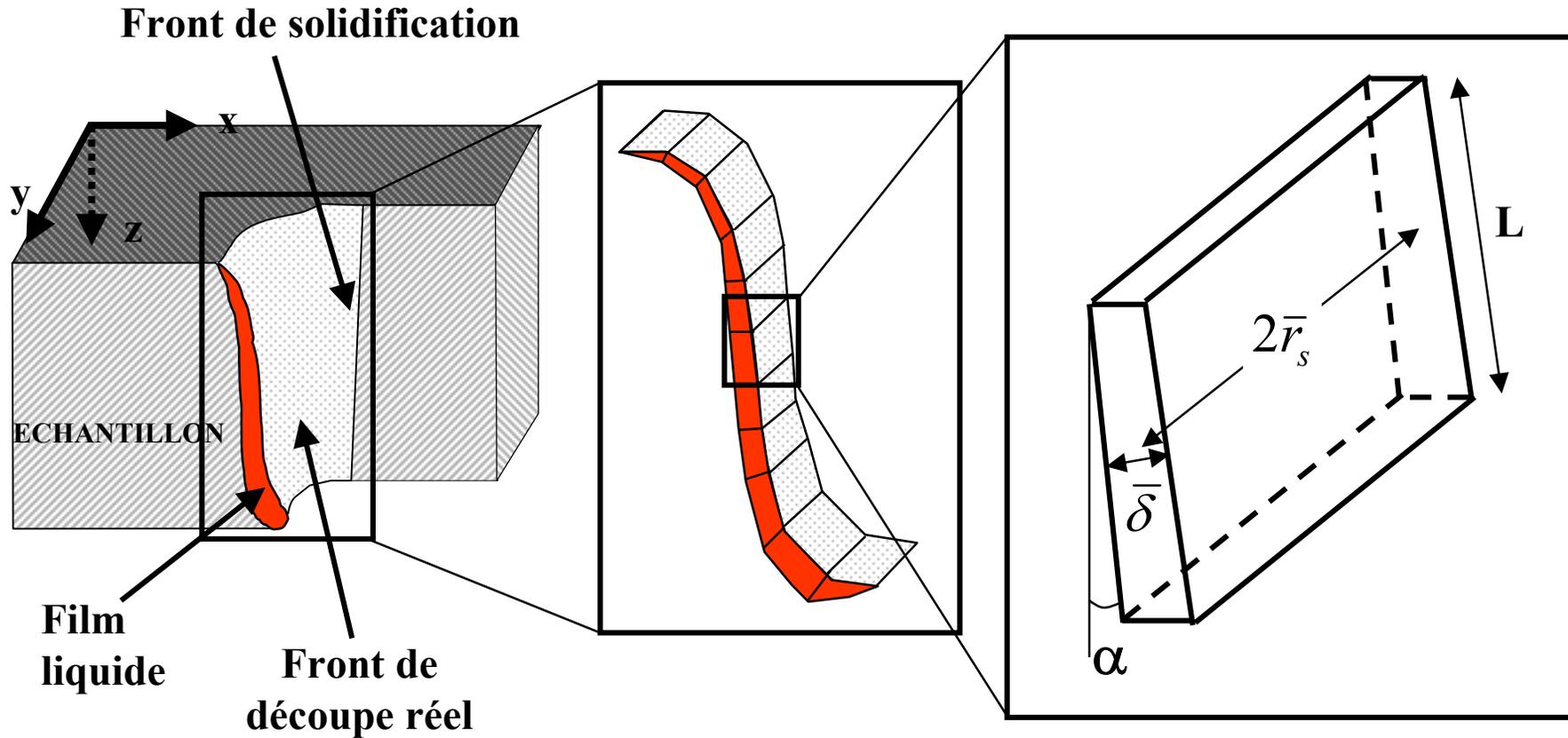
$$E(x, y, z) = A_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)} \right) \times \exp -i \left( [kz - \phi(z)] + k \frac{x^2 + y^2}{2R(z)} \right)$$

$$\Delta_r E_0(s, z) - 2ik \frac{\partial E_0(s, z)}{\partial z} = 0$$

$$P_{\text{out}}^{1,2} = \frac{2}{\pi} \rho C_0 (\Gamma_0 - \Gamma_0) v_0 2(\gamma + \bar{\delta}) \left[ 1 + \left( \frac{P_0 e}{2} \right)^{0.7} \right]$$

$$\Gamma = \frac{e \omega^2 L}{K} \Gamma_0$$

$$\Delta P_{\text{out}} = \sum_{\omega_0 \rightarrow \omega} A [\mathcal{A}(\omega)] I(\omega) \cos[\mathcal{A}(\omega)] S(\omega) \Delta \omega$$

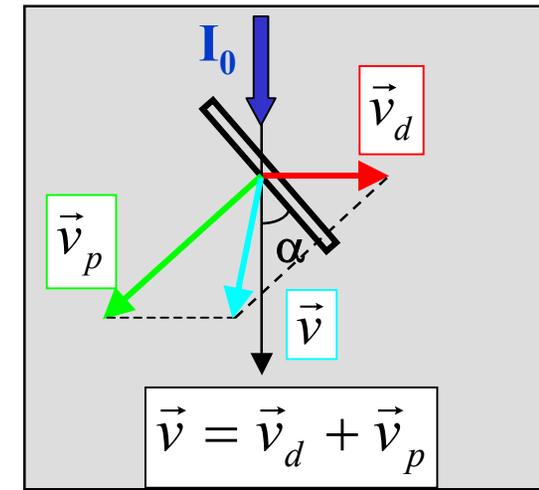
1-Approche géométrique : définition de la zone de travail

Projection 2D du front de découpe

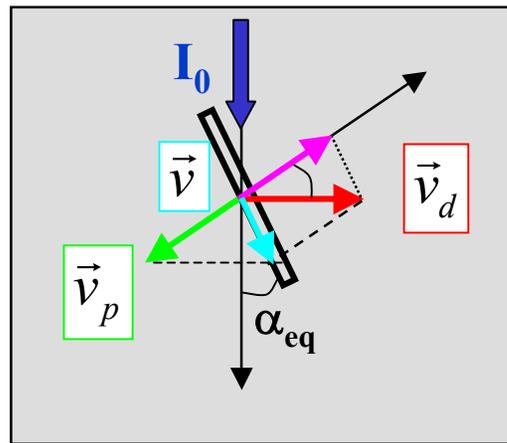
Cellule élémentaire parallélépipédique (volume de contrôle)

1-Approche géométrique : condition de stationnarité du front de découpe

## \* Concept de vitesse de perçage



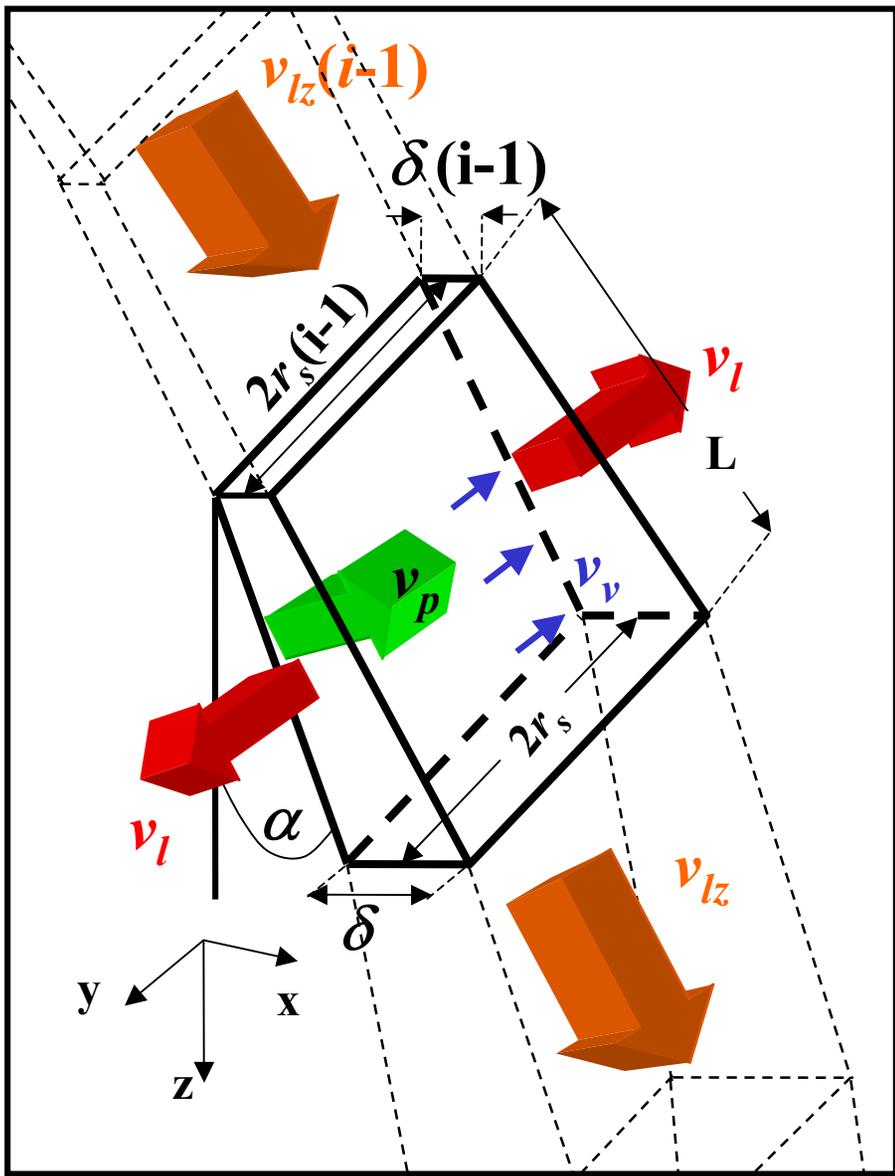
CONVERGE VERS  
UN ETAT  
STATIONNAIRE

$$v_p(\alpha_{eq}) = v_d \cos \alpha_{eq}$$

Vérifiée en chaque point du  
profil de coupe

2-Équation bilan : conservation de la masse

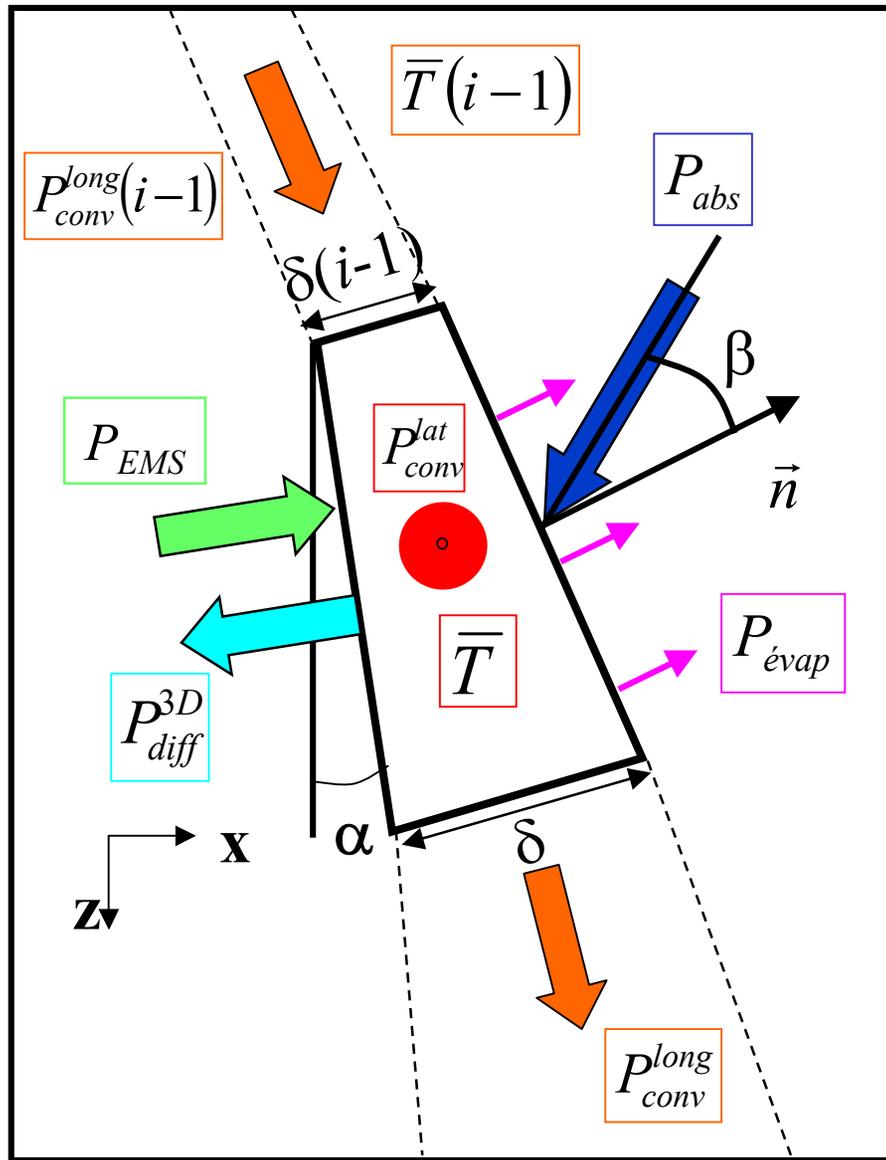


$$\left( \frac{dm}{dt} \right)_{\text{entrant}} = \left( \frac{dm}{dt} \right)_{\text{sortant}}$$

$$\left( \frac{dm}{dt} \right)_{\text{entrant}} = \underbrace{\rho_s v_p 2\bar{r}_s L}_{\text{Matière solide}} + \underbrace{\rho_l v_{lz}(i-1) 2r_s(i-1) \delta(i-1)}_{\text{Gain convection longitudinale}}$$

$$\left( \frac{dm}{dt} \right)_{\text{sortant}} = \underbrace{2\rho_l v_l \bar{\delta} L}_{\text{Perte convective latérale}} + \underbrace{\rho_l v_{lz} 2r_s \delta}_{\text{Perte convective longitudinale}} + \underbrace{\rho_l v_v 2\bar{r}_s L}_{\text{Perte par évaporation}}$$

## 2-Équation bilan : conservation de l'énergie



$$P_{abs} + P_{conv}^{long}(i-1) + P_{EMS} = P_{diff}^{3D} + P_{conv}^{lat} + P_{conv}^{long} + P_{evap}$$

$$P_{abs} = \bar{I} A_{circ}(\beta) \times 2\bar{r}_s L \cos \beta$$

$$P_{conv}^{long}(i-1) = \rho_l v_{lz}(i-1) \delta(i-1) \times 2r_s(i-1) [C_{pl} \bar{T}(i-1) + L_f]$$

$$P_{EMS} = \rho_s v_p L \times 2(\bar{r}_s + \bar{\delta}) C_{ps} T_f$$

$$P_{diff}^{3D} = \frac{2}{\pi} \rho_s v_p L \times 2(\bar{r}_s + \bar{\delta}) C_{ps} (T_f - T_0) \times \left[ 1 + \left( \frac{(\bar{r}_s + \bar{\delta}) v_p}{2\kappa_s} \right)^{-0.7} \right]$$

$$P_{conv}^{lat} = 2\rho_l v_l \bar{\delta} L [C_{pl} \bar{T} + L_f]$$

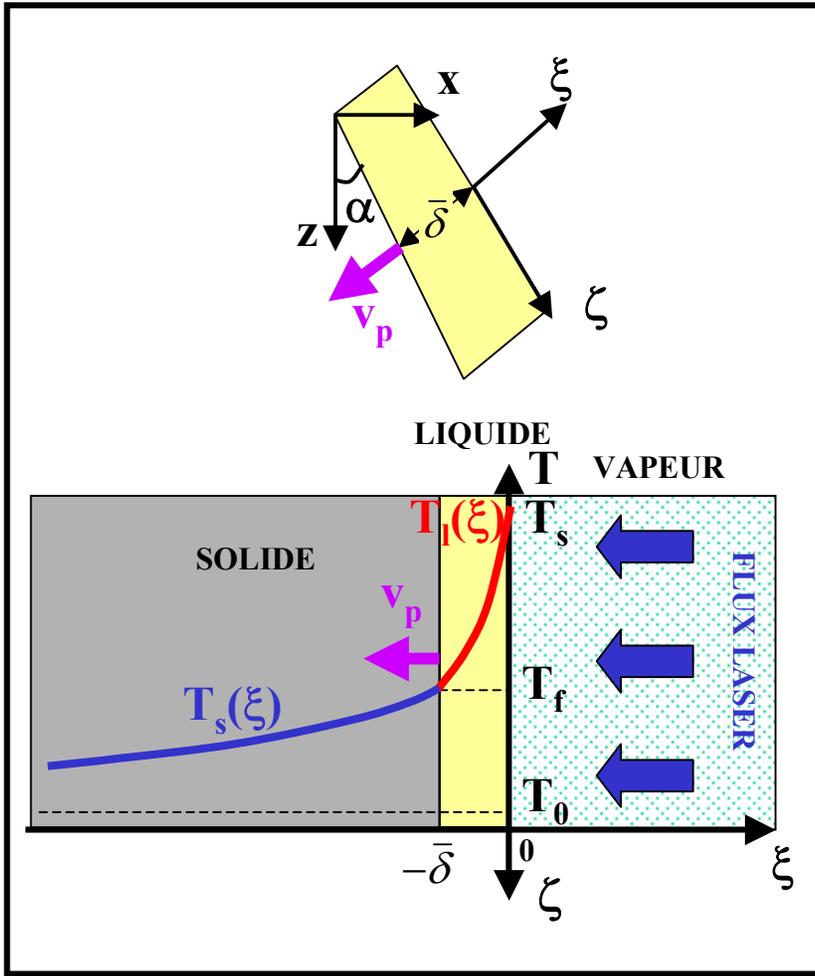
$$P_{conv}^{long} = \rho_l v_{lz} \delta \times 2r_s [C_{pl} \bar{T} + L_f]$$

$$P_{evap} = \rho_l v_v L_v L \times 2\bar{r}_s$$

### 3-Évaluation de l'épaisseur du film liquide : *thermique plane en découpe laser*

Hypothèses: ☒ Utilisation de l'équation de la chaleur 1D car  $\delta \ll 2r_s$

☒ Les interfaces de changement de phase sont supposées planes



EQUATION DE LA CHALEUR 1D  
AVEC FLUIDE EN MOUVEMENT

$$v_p \frac{dT_{s,l}}{d\xi} = \kappa_{s,l} \frac{d^2 T_{s,l}}{d\xi^2}$$

$T_s(\xi)$

$T_l(\xi)$

+

CONDITION DE STEFAN:

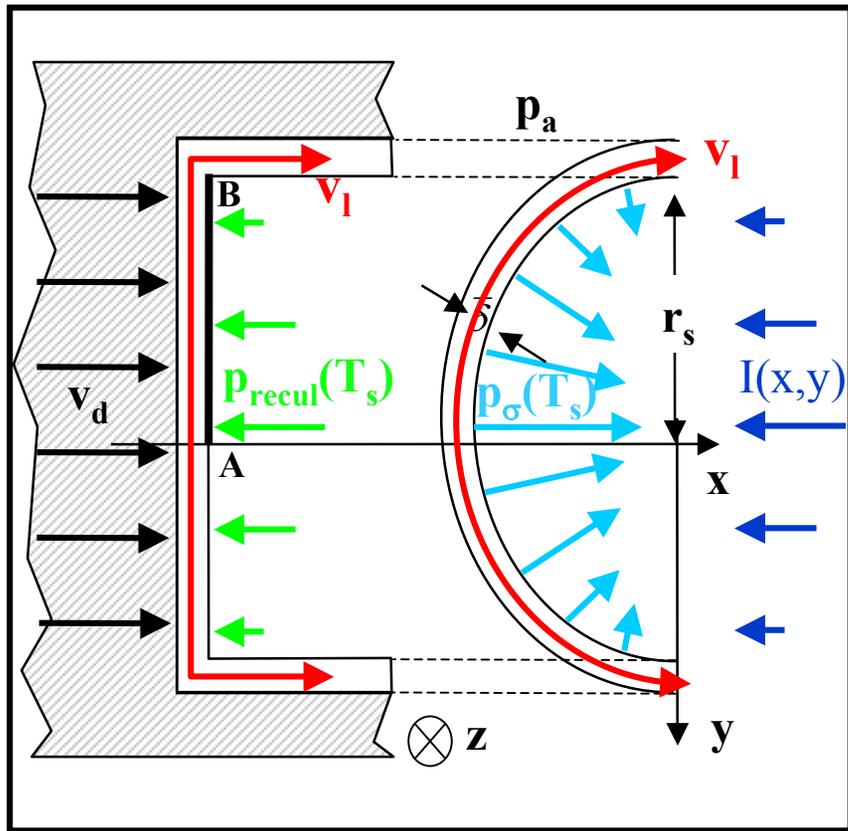
$$K_l \left. \frac{dT_l(\xi)}{d\xi} \right|_{\xi=-\bar{\delta}} - K_s \left. \frac{dT_s(\xi)}{d\xi} \right|_{\xi=-\bar{\delta}} = \rho_s v_p L_f$$

$$\bar{\delta} = \frac{\kappa_l}{v_p} \ln \left( 1 + \frac{\rho_l C_{pl} (T_s - T_f)}{\rho_s L_f + \rho_s C_{ps} (T_f - T_0)} \right)$$

## 4-Dynamique du film liquide : *vitesse d'éjection latérale* $v_l$

### EQUATION DE BERNOULLI MODIFIEE

$$\underbrace{\frac{1}{2} \rho_l v_l^2}_{\text{pression dynamique}} + \underbrace{p}_{\text{pression}} + \underbrace{\int_0^{r_s} \tau_l \frac{dl}{dS} dy}_{\text{forces de friction}} = \text{Cte sur une ligne de courant}$$



$$p_{\text{recul}} = f[p_{\text{sat}}(T_s)]$$

$$v_l = -\frac{2\eta_l r_s}{\rho_l \delta^2} + \sqrt{\left[\frac{2\eta_l r_s}{\rho_l \delta^2}\right]^2 + \frac{2}{\rho_l} \Delta p|_{T_s \rightarrow T_f}}$$

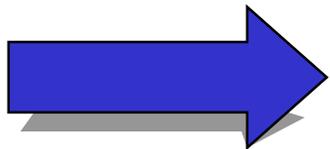
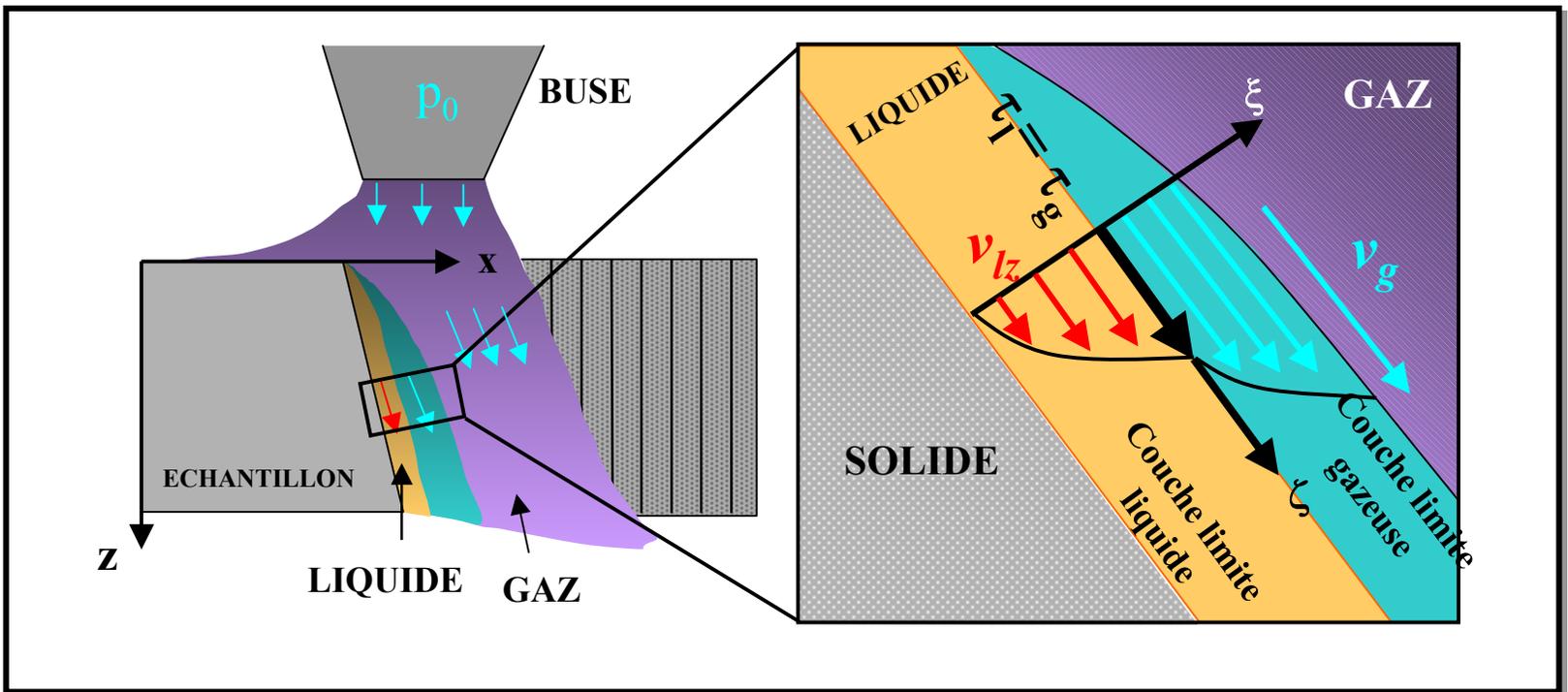
avec

$$\Delta p|_{T_s \rightarrow T_f} = (p_{\text{recul}} - p_{\sigma})|_{A \rightarrow B}$$

#### 4-Dynamique du film liquide : *vitesse d'éjection longitudinale* $v_{lz}$

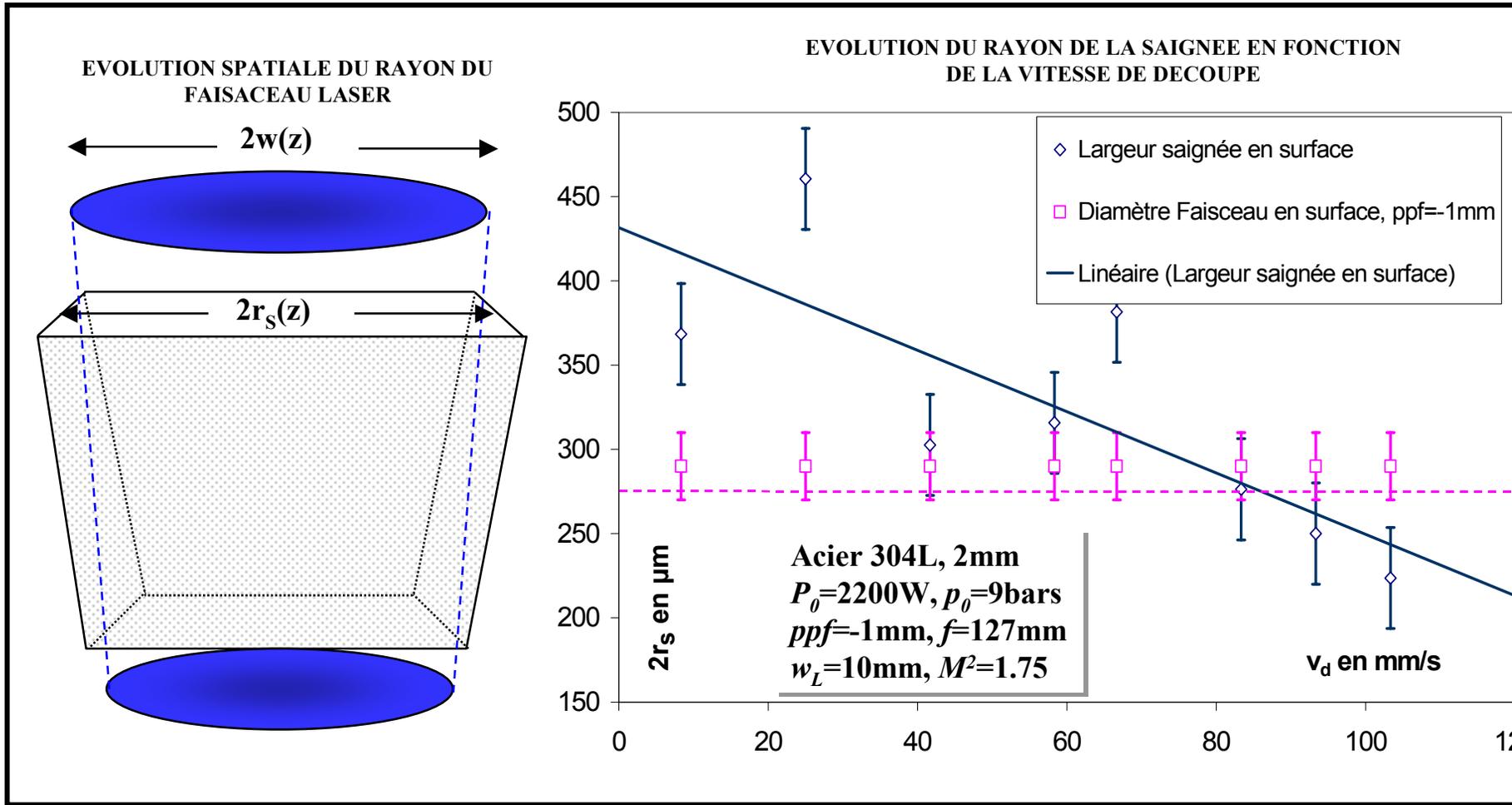
Égalité des contraintes de cisaillement à l'interface liquide-gaz

$$\tau_l = \tau_g \quad \Rightarrow \quad \eta_l \left. \frac{dv_{lz}}{d\xi} \right|_{\xi=\bar{\delta}} = \frac{f}{8} \rho_g v_g^2 \left|_{\xi=\bar{\delta}}$$

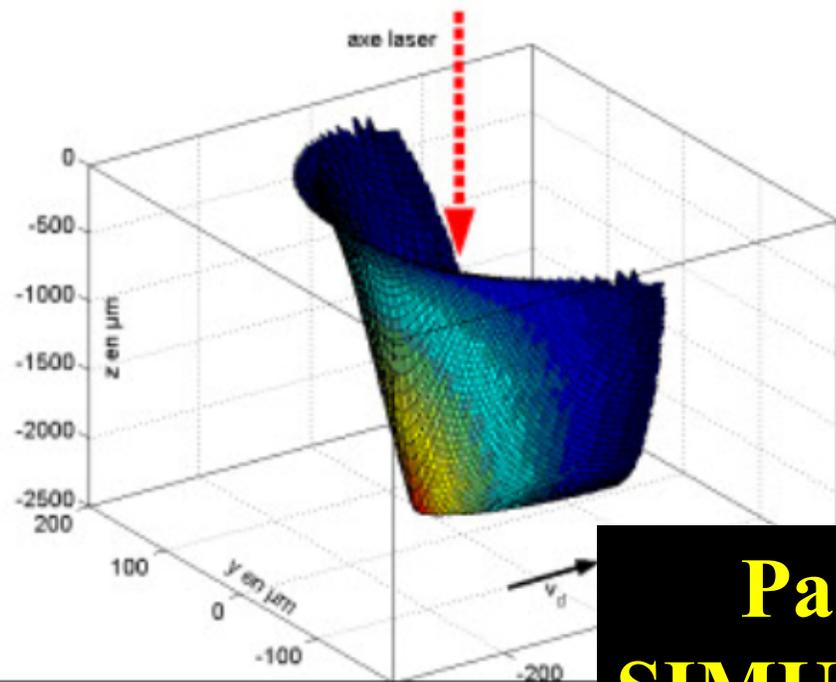


$$v_{lz} = \frac{f}{16\eta_l} \bar{\delta} \rho_g v_g^2$$

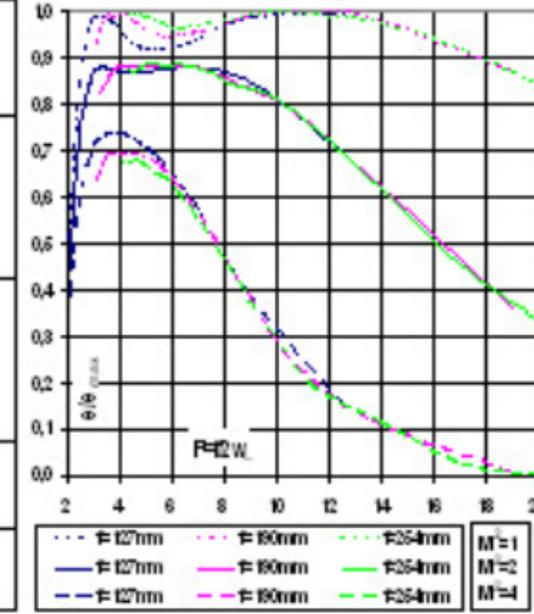
## 6-Estimation expérimentale du rayon de la saignée : $r_s$



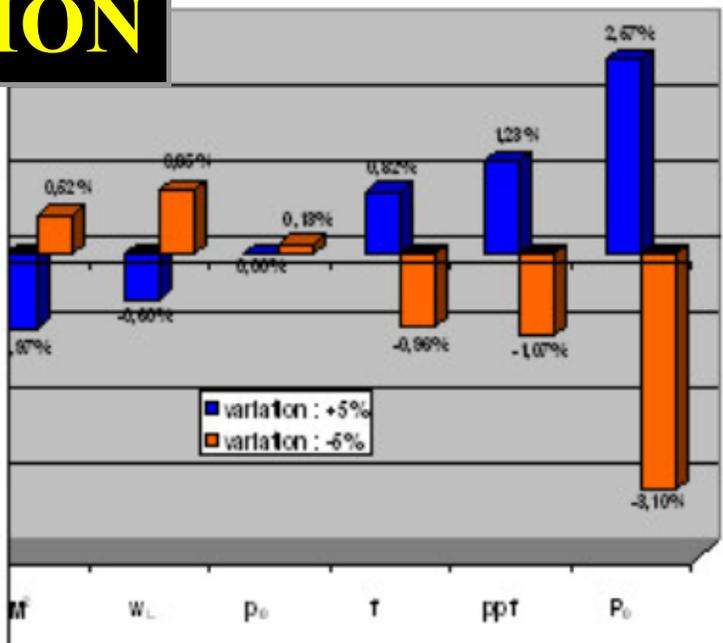
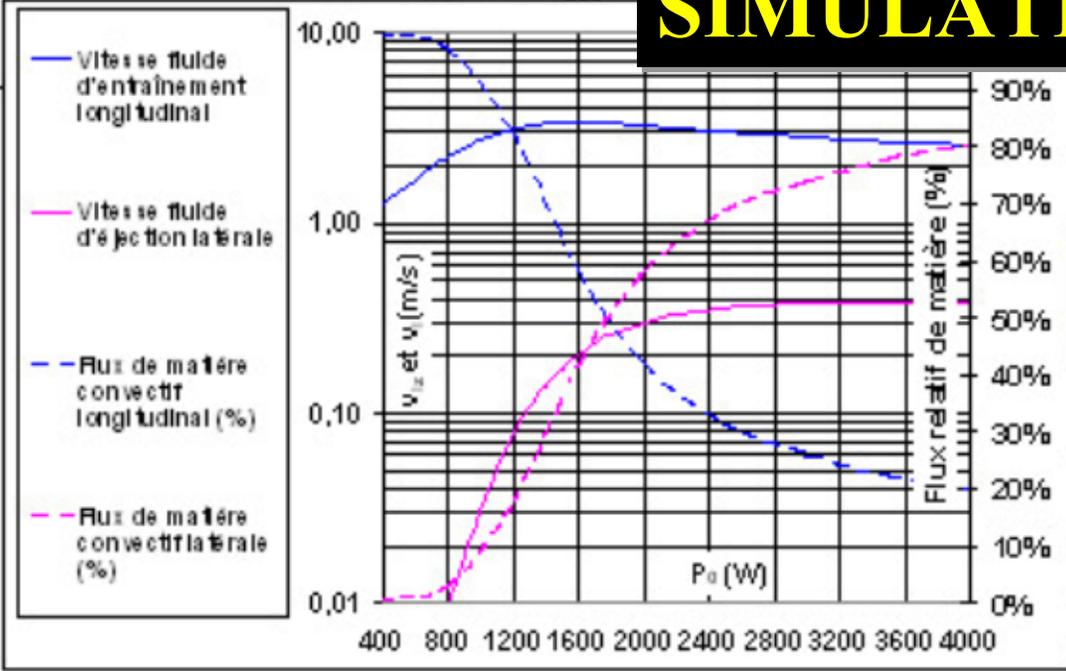
$$r_s(z) = pw(z) \left( 1 - \frac{v_d}{2v_{crit}} \right) \text{ avec } p = 1.48 \text{ et } v_{crit} = 119 \text{ mm/s}$$



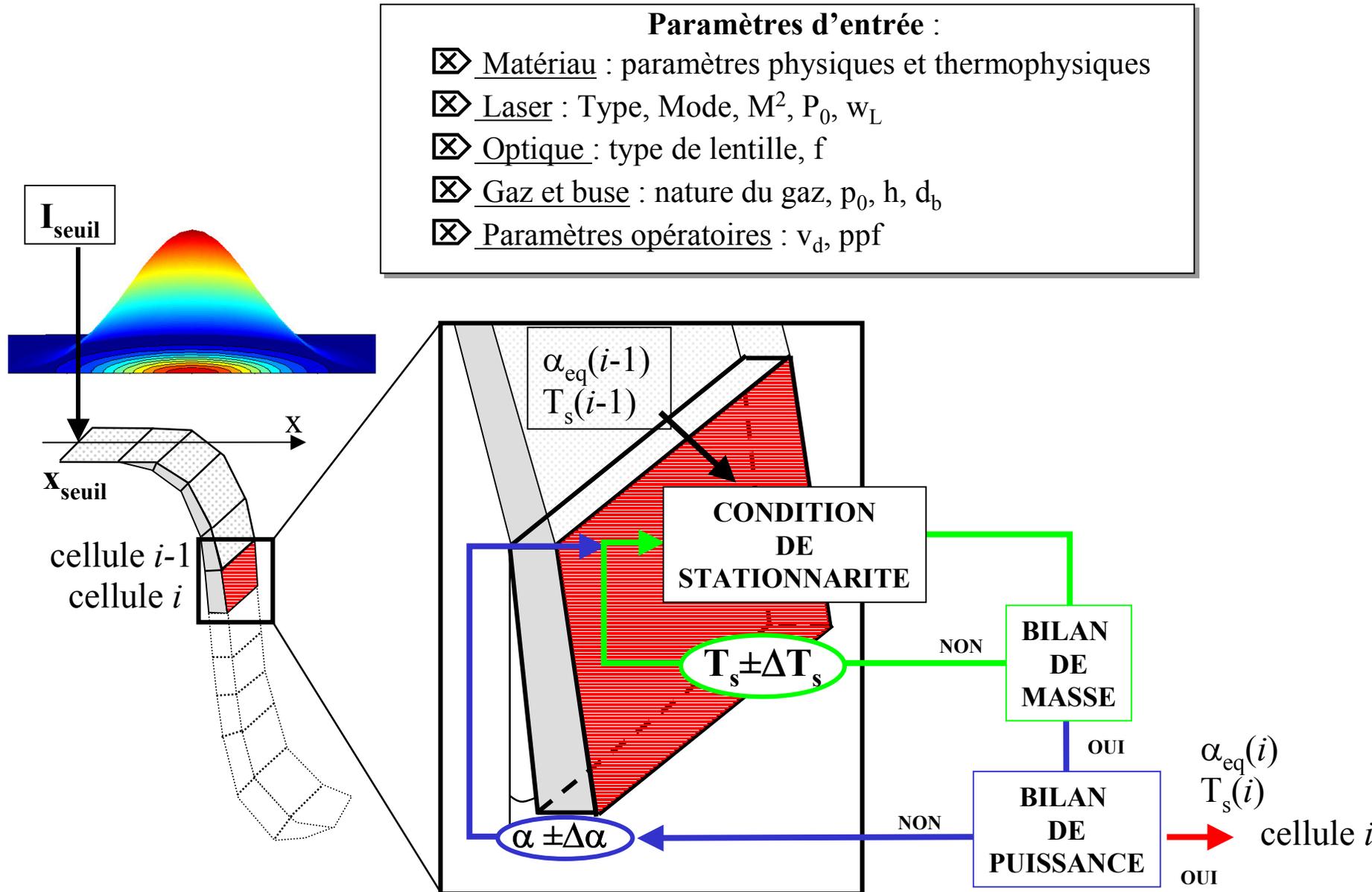
Matériau : Inconel 704L  
 Balcoeur : variable  
 Laser (CO<sub>2</sub>)  
 Mode : TBM100  
 M<sup>2</sup> = 2  
 P = 1000W  
 W : variable  
 Chapelet convoie  
 T : variable  
 ppf = 2mm  
 P<sub>0</sub> = 10 bars



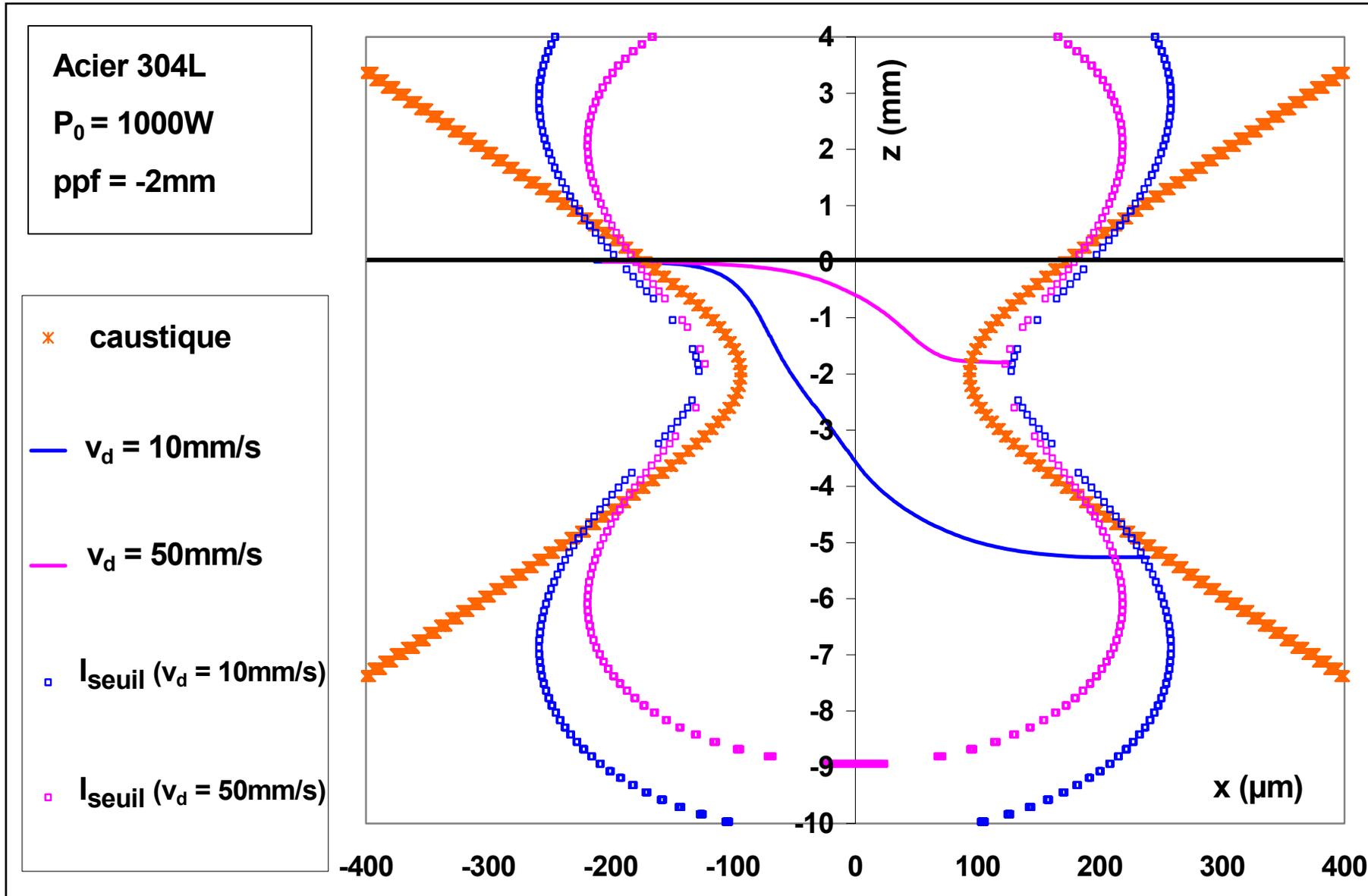
# Partie II SIMULATION



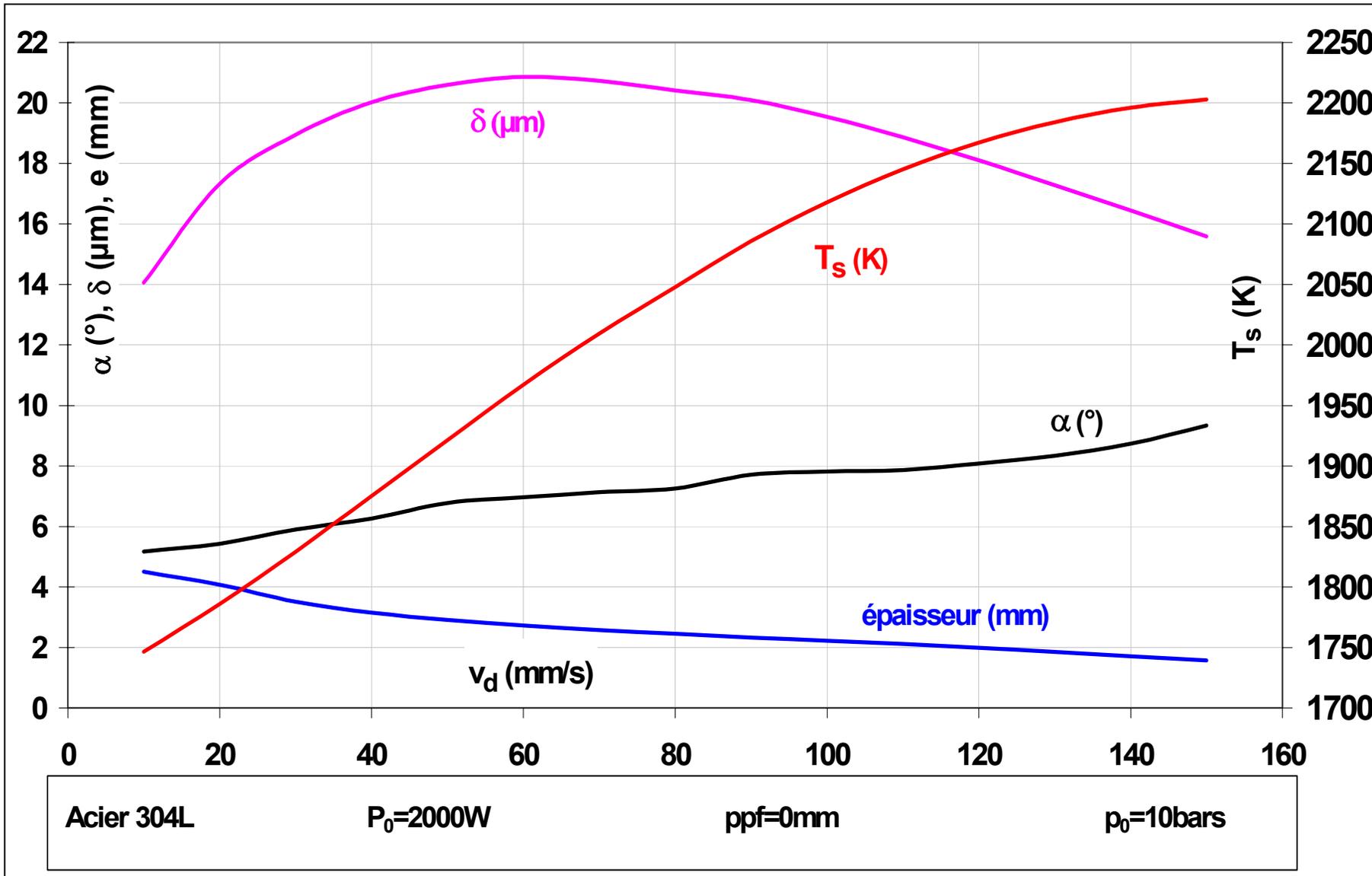
# 1-Méthode de résolution numérique



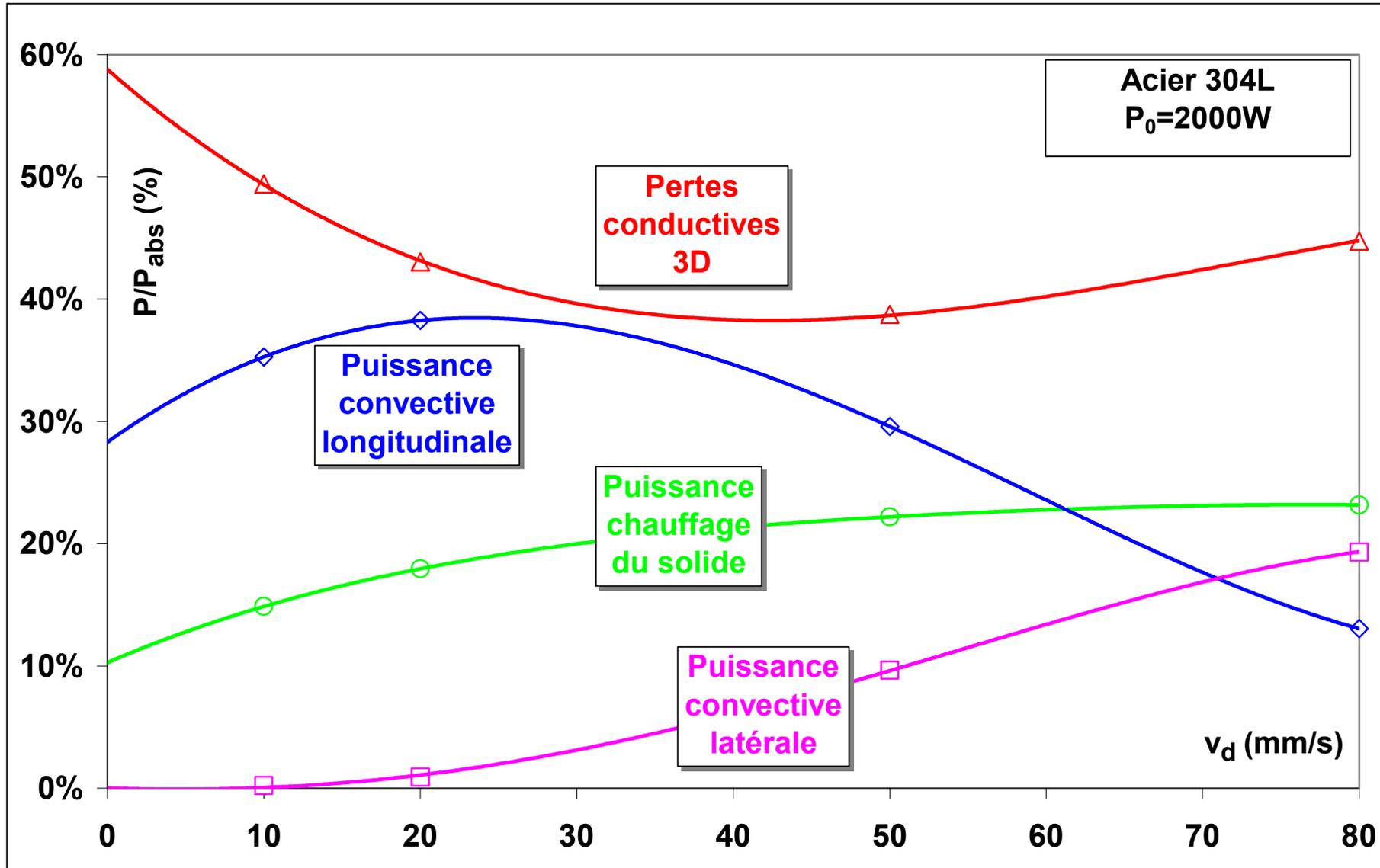
## 2-Résultats de simulation : *iso-intensités seuils et profils de découpe*



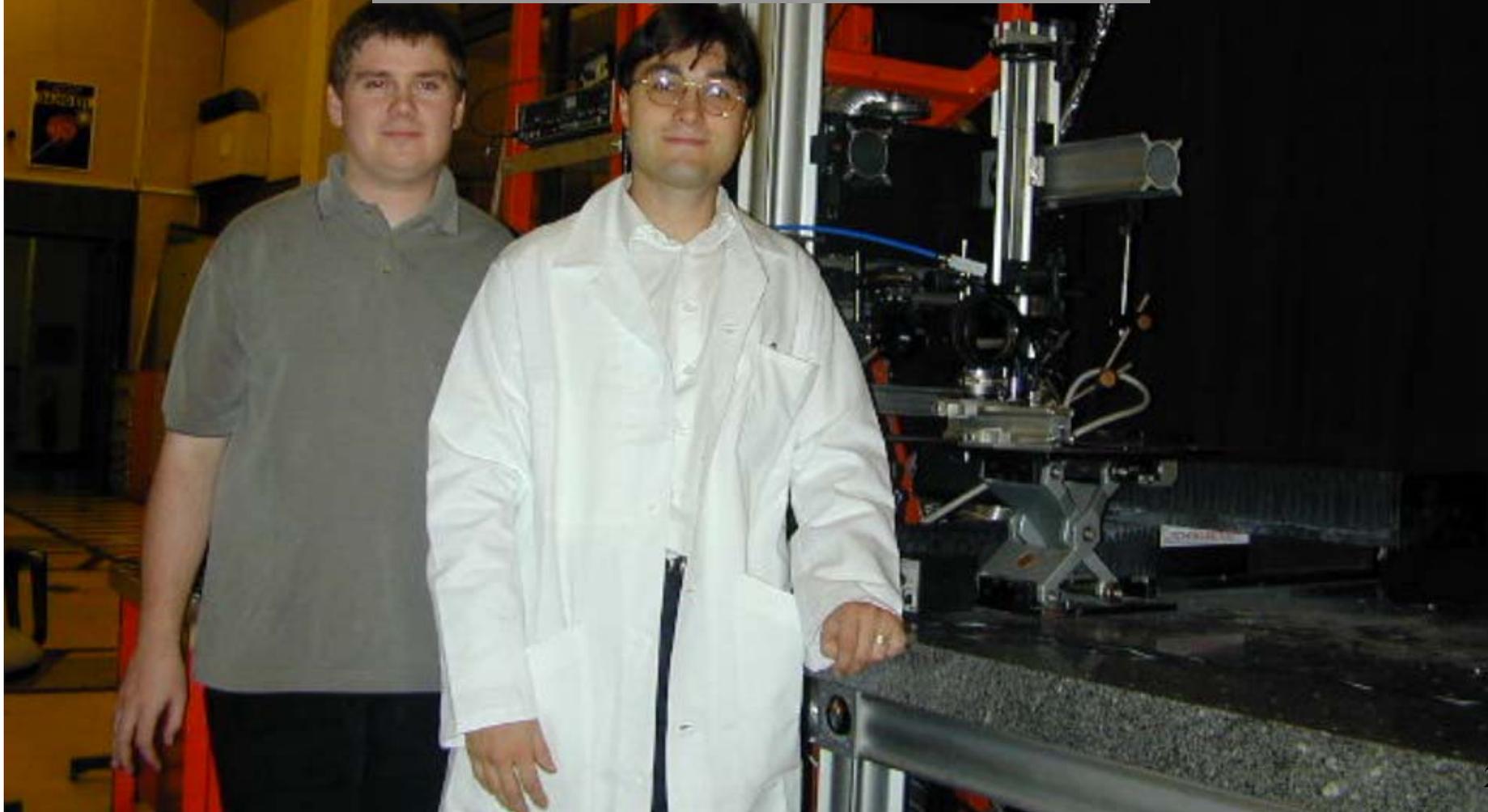
## 2-Résultats de simulation : évolution des paramètres de sortie



## 2-Résultats de simulation : répartition des termes de puissances



# Partie III EXPERIMENTATIONS ET COMPARAISONS



# 1-A Expériences de découpe : recherche de la vitesse de découpe maximum

## expériences

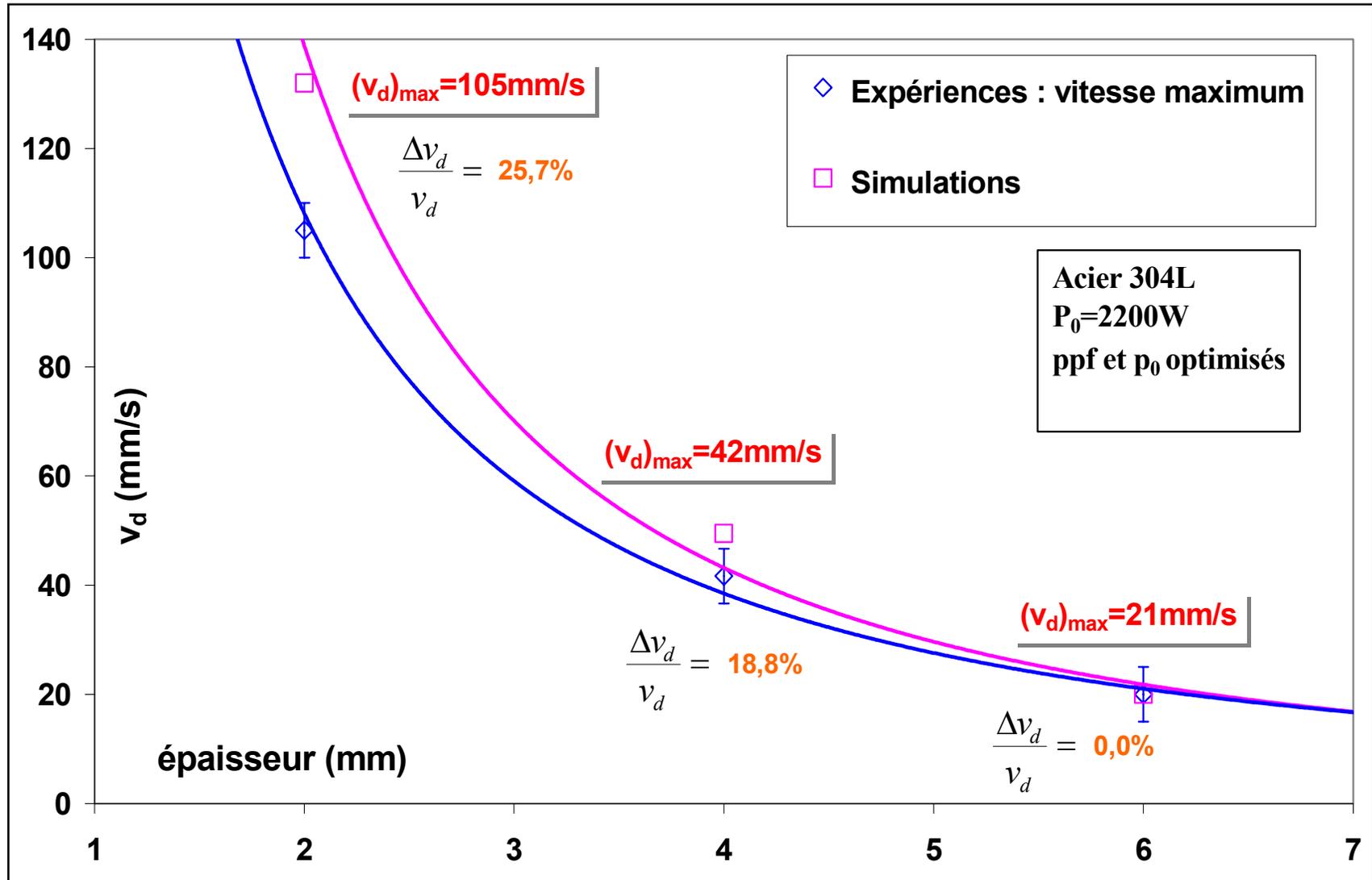
$e, P_0, ppf$  fixés  $\rightarrow v_{dmax}$

## simulations

$P_0, ppf$  fixés  $\rightarrow v_{dmax}, e$

## Comparaisons

vitesse de coupe



# 1-B Expériences de découpe : recherche de la puissance laser minimum

## expériences

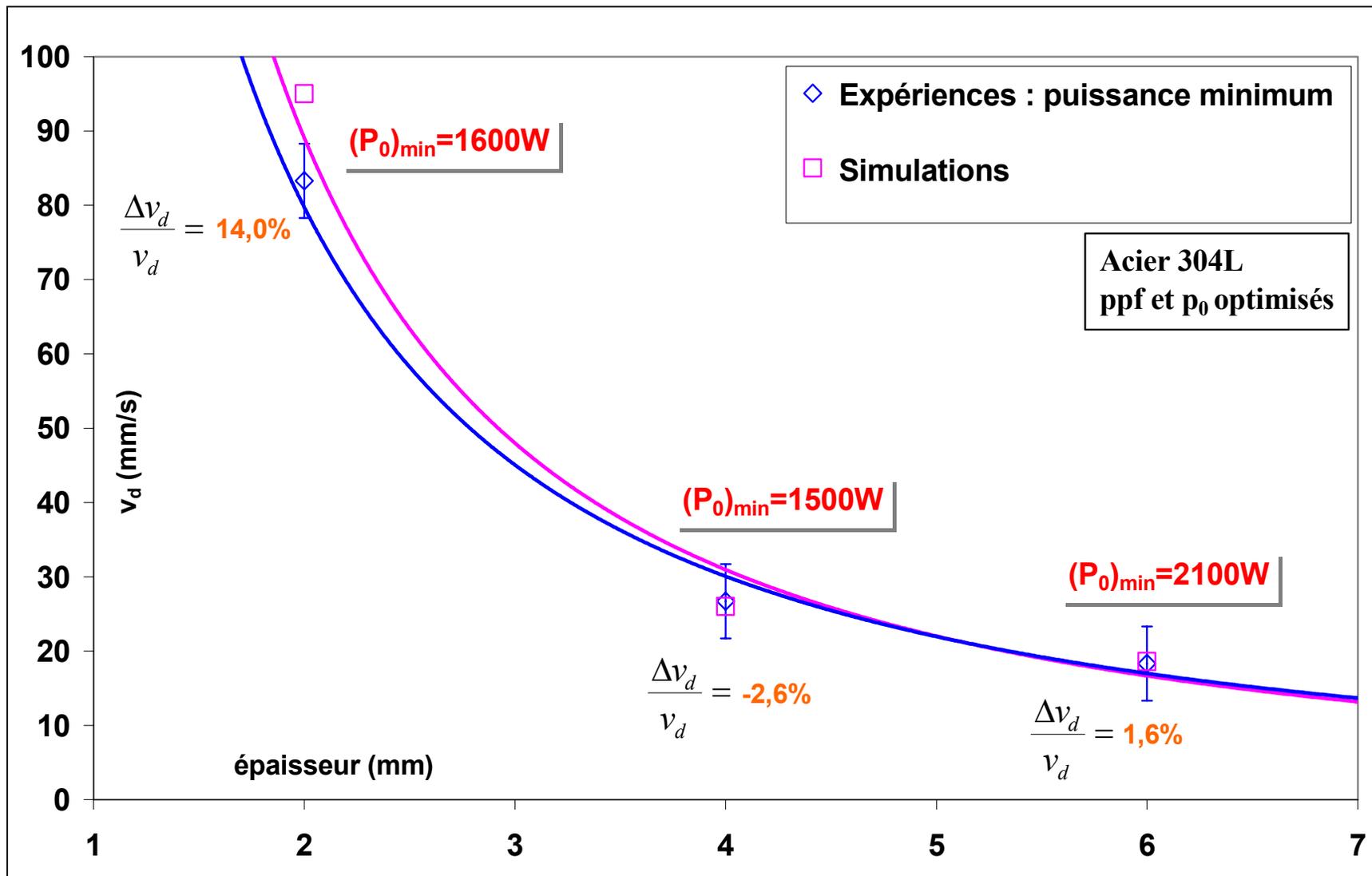
$e, v_d, p_{pf}$  fixés  $\rightarrow (P_o)_{min}$

## simulations

$p_{pf}, (P_o)_{min}$  fixés  $\rightarrow v_d, e$

## Comparaisons

vitesse de coupe



# 1-C Expériences de découpe : recherche de la défocalisation maximum

expériences

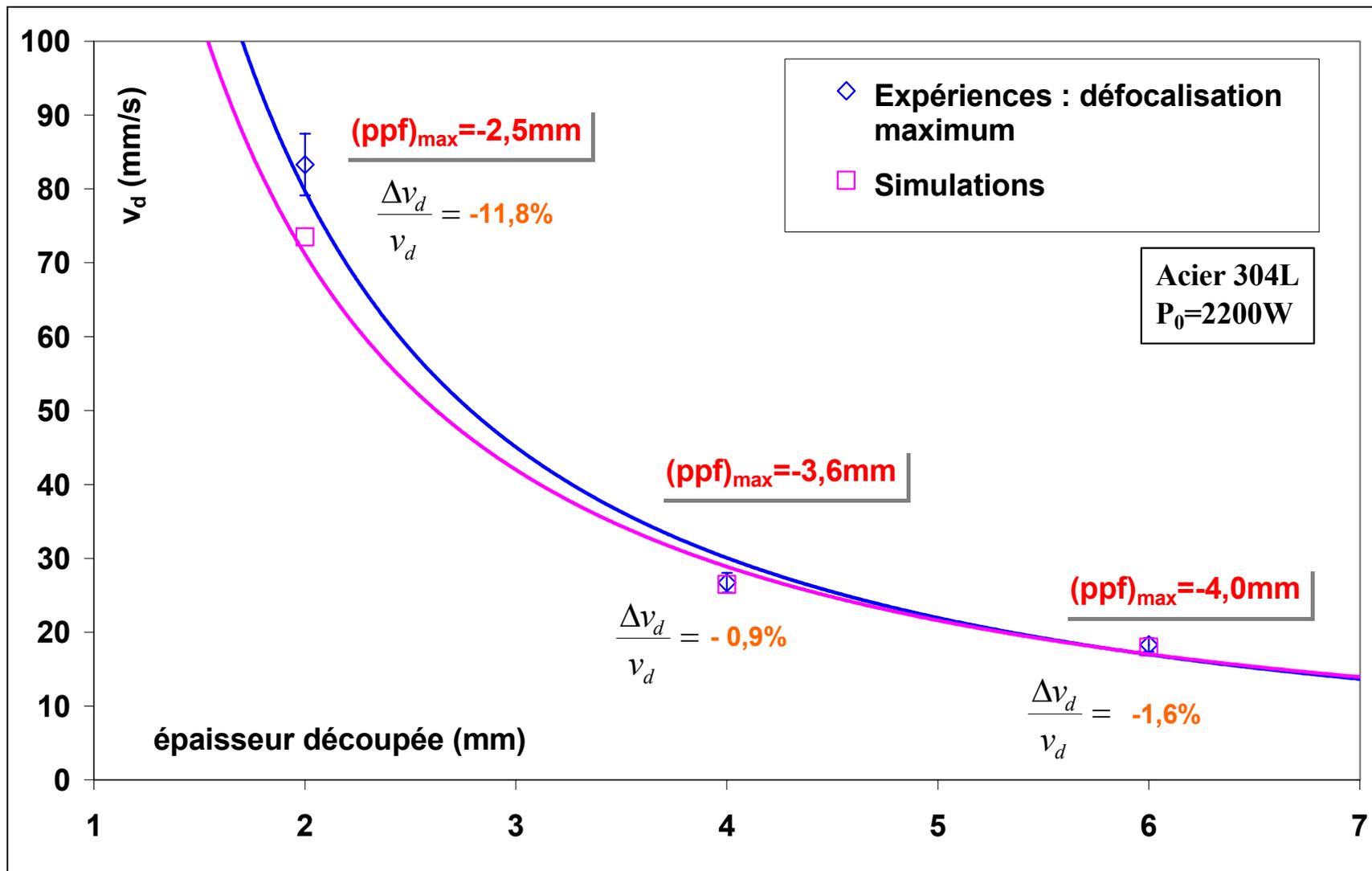
$e, v_d, P_0$  fixés  $\rightarrow (ppf)_{max}$

simulations

$P_0, (ppf)_{max}$  fixés  $\rightarrow v_d, e$

Comparaisons:

vitesse de coupe



## 2-Retour sur l'absorptivité

→ **Modèle de Drude**

→ **Equations de Fresnel**

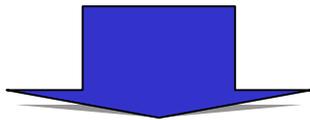
### Hypothèses

▶ **Matériau en phase solide**

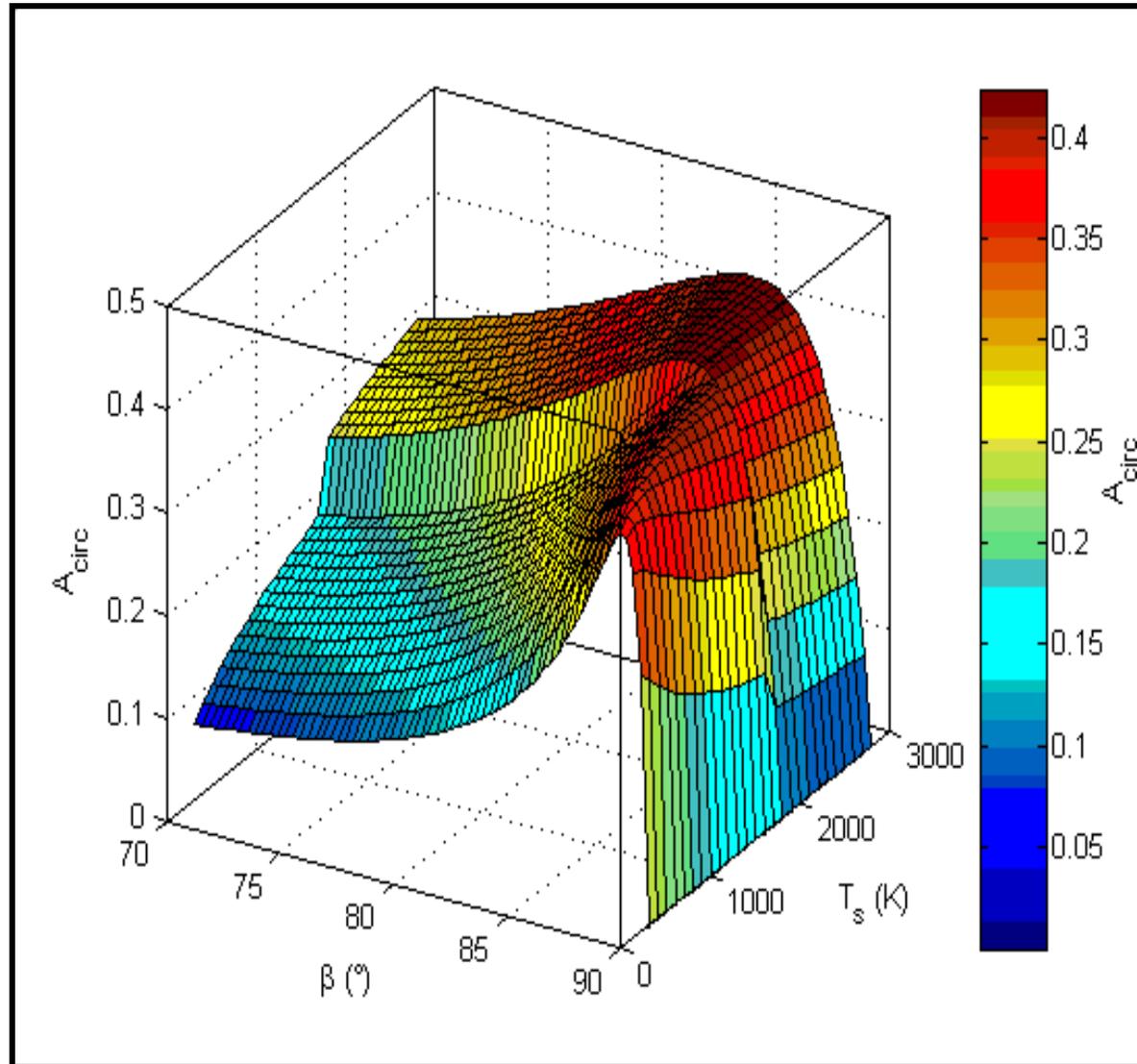
▶ **Surface d'interaction parfaitement plane**

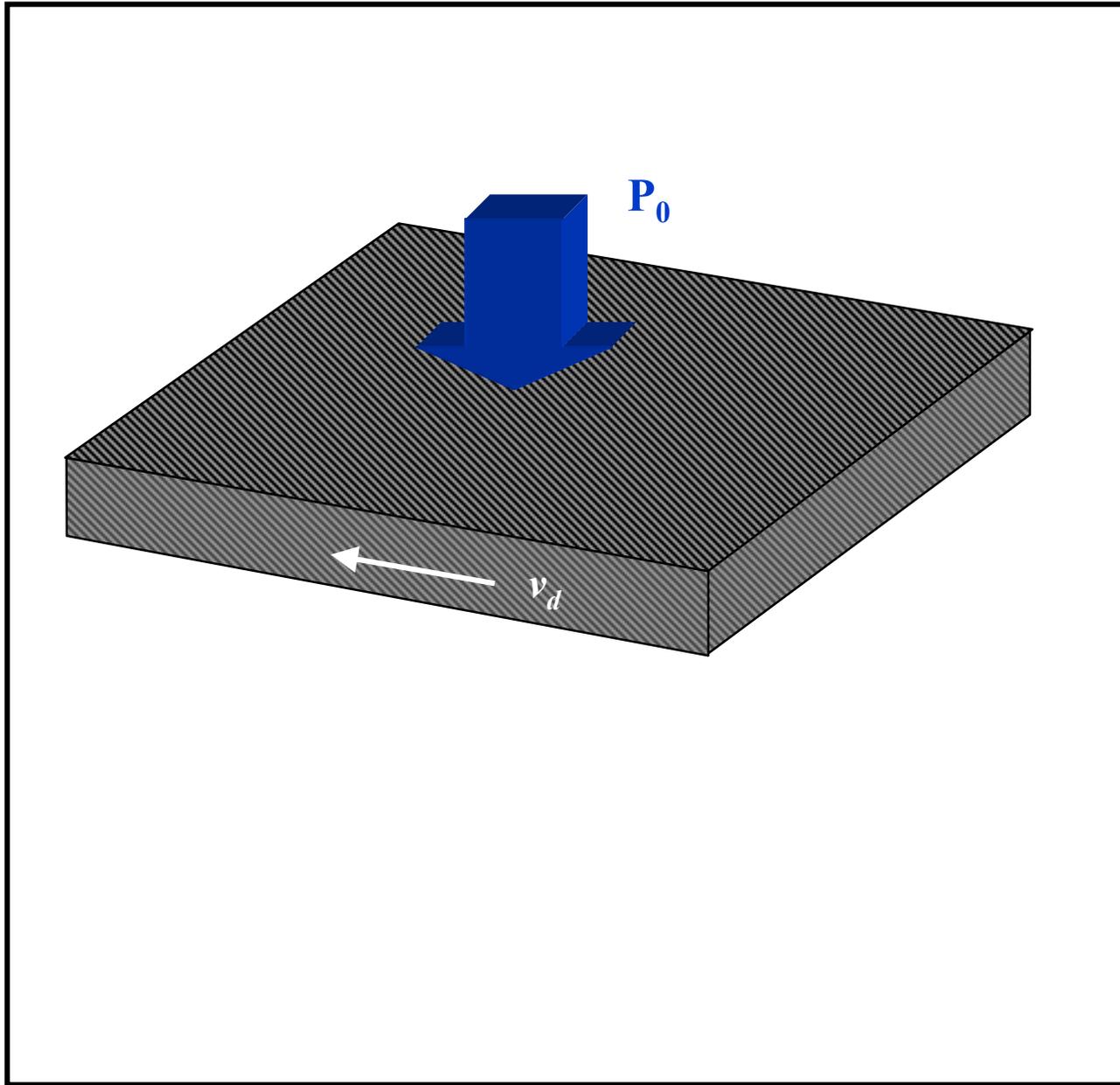
→ **Absorptivité théorique (polarisation circulaire, acier inoxydable) :**

$$A_{Fr} \in [30\%; 40\%]$$

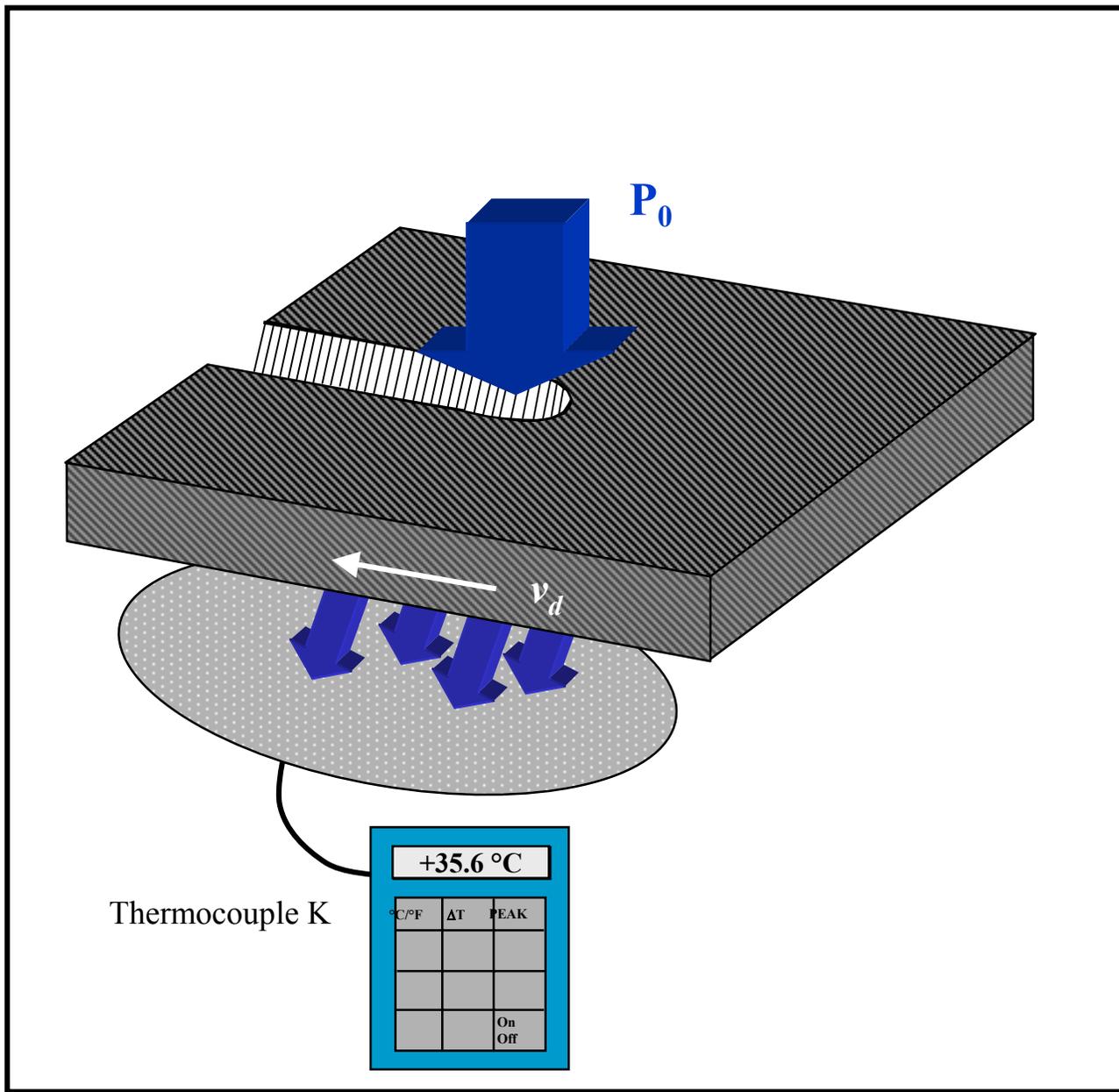


$$A_{exp} = ?$$

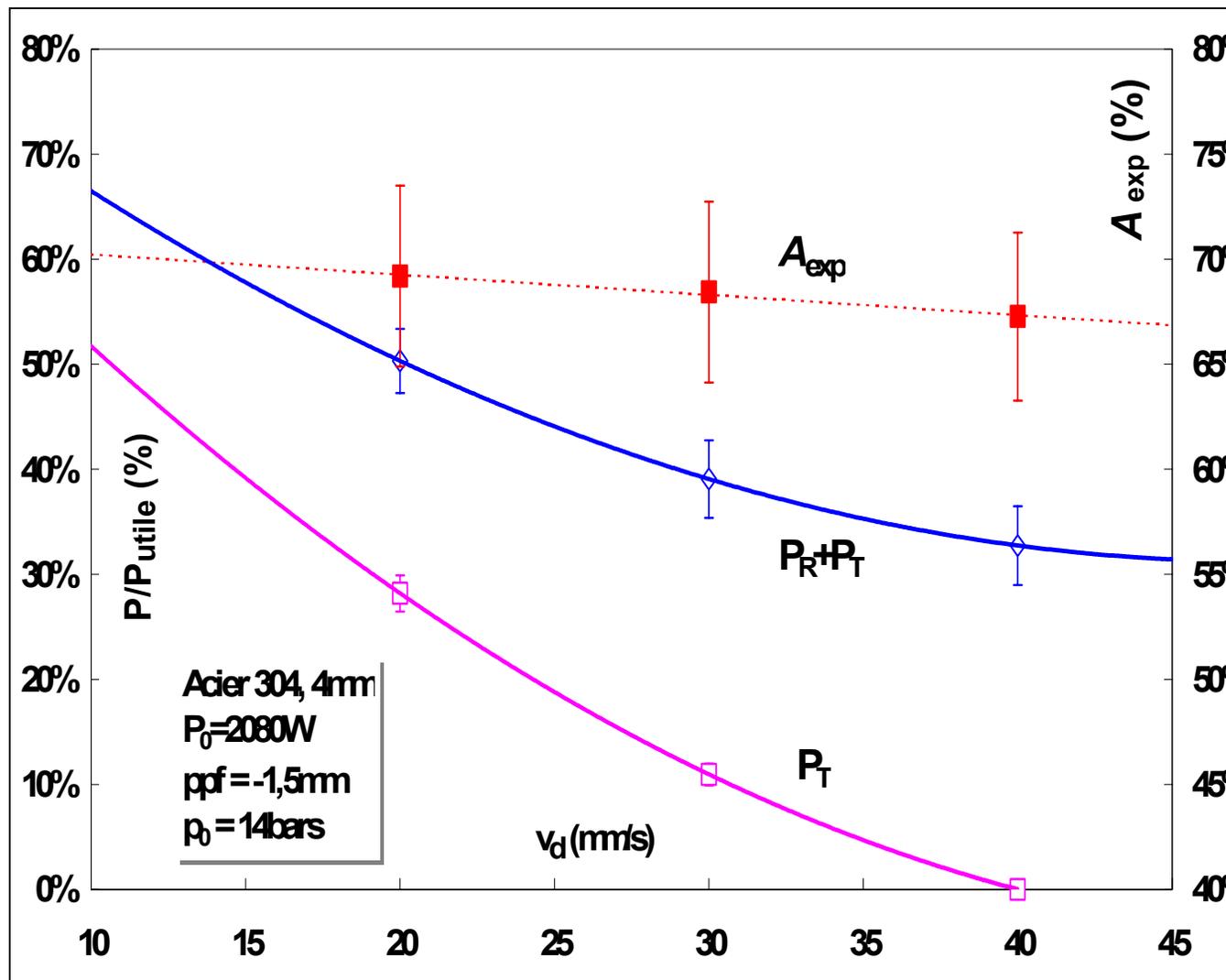
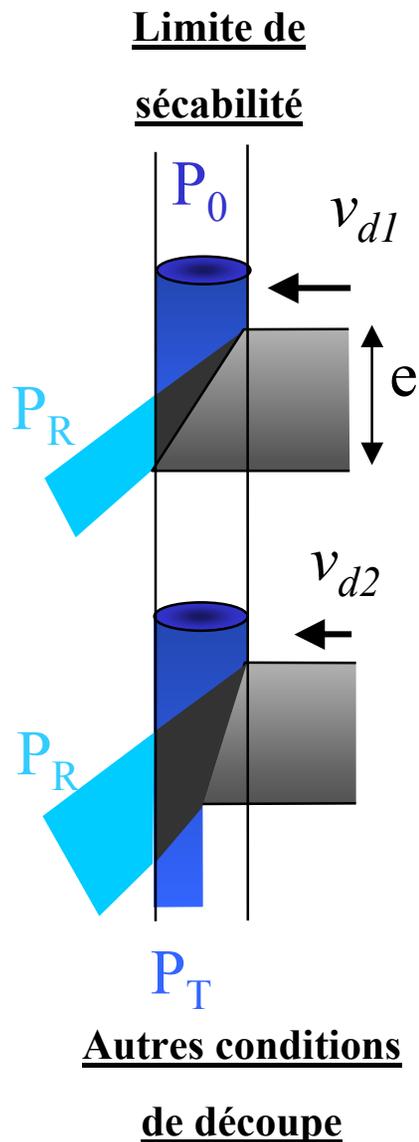


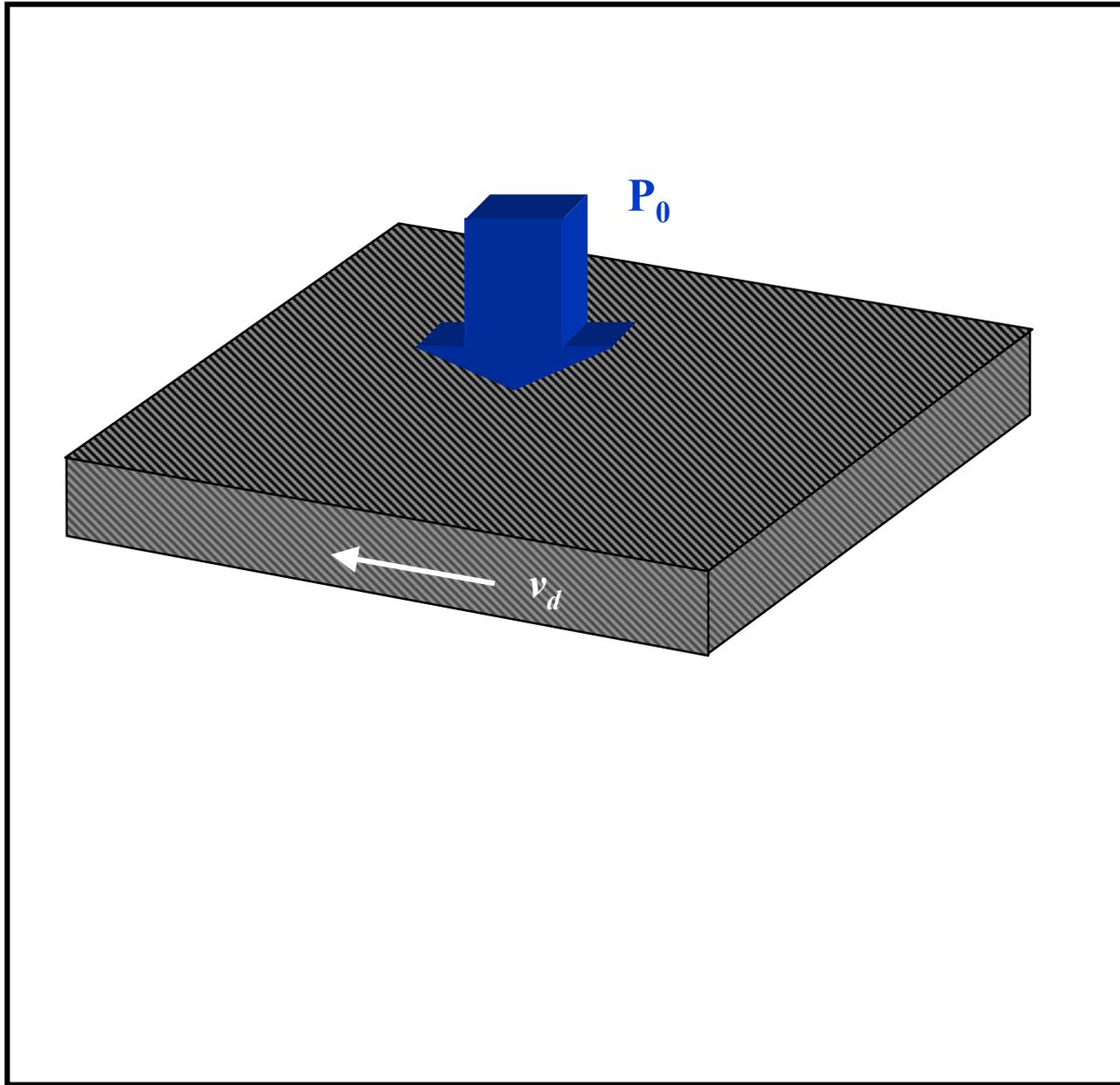
2-Absorptivité : mesure par transmission

## 2-Absorptivité : mesure par transmission

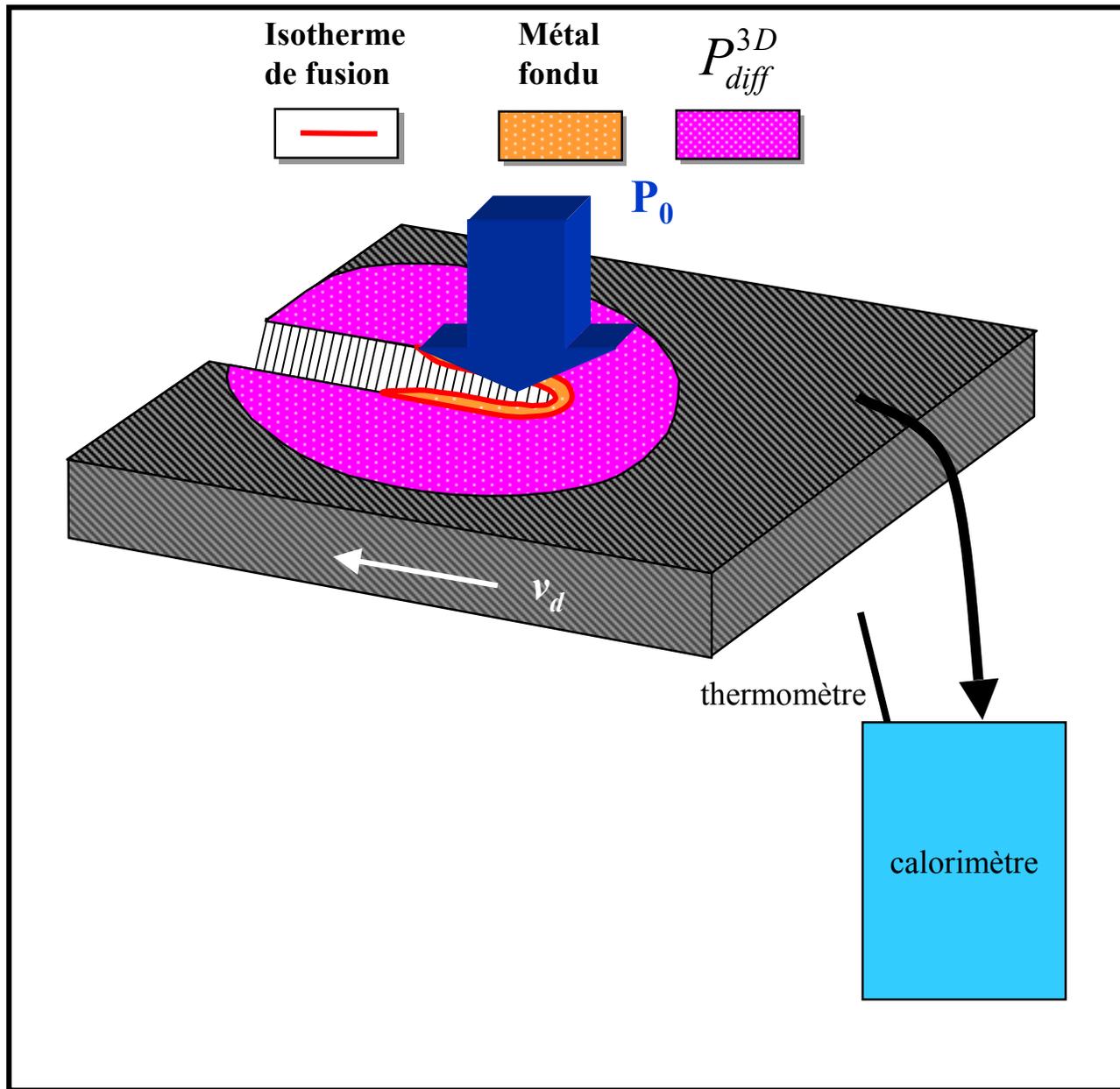


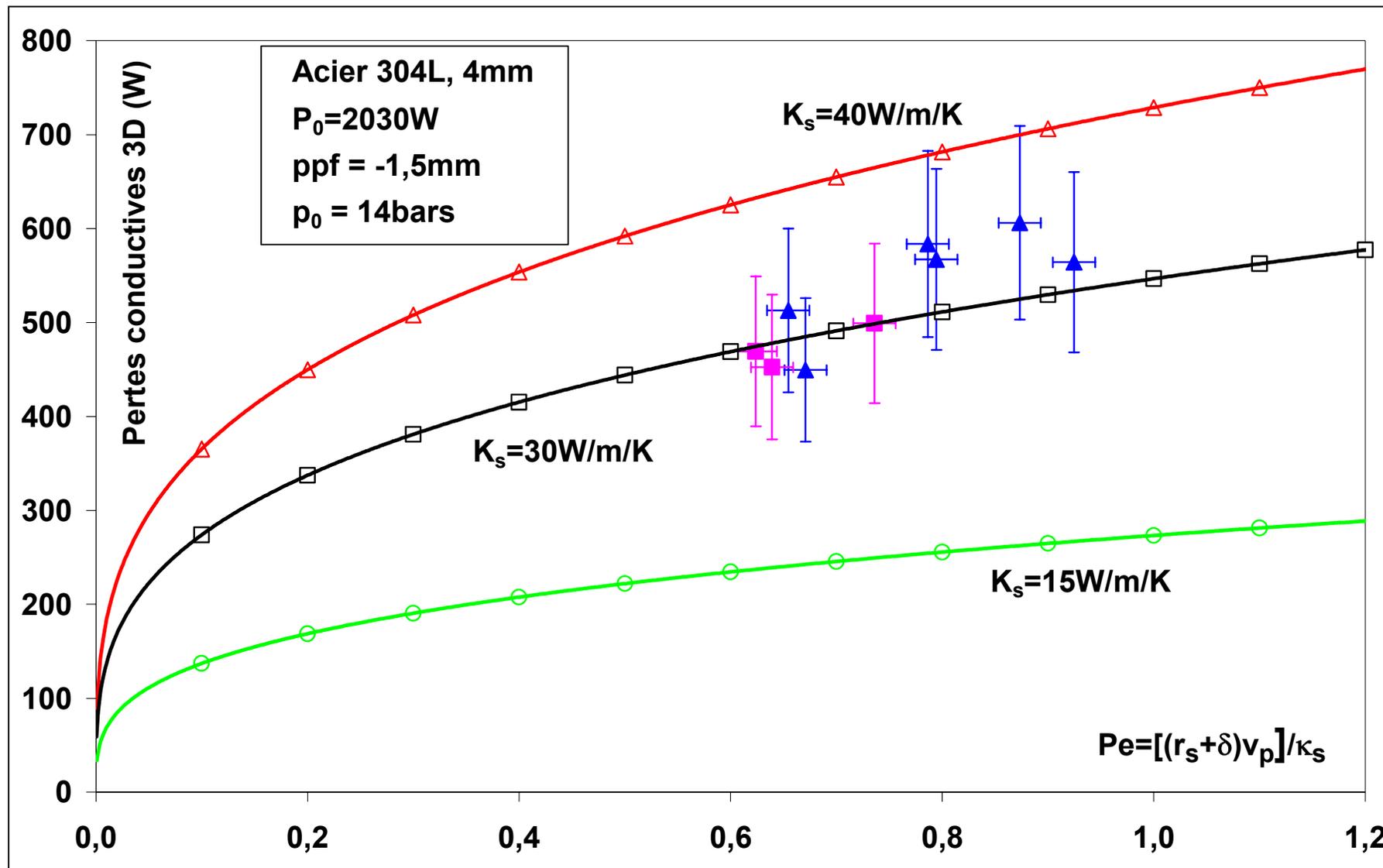
## 2-Mesures d'absorptivités : *détermination des puissances lasers transmises*



2-Absorptivité : mesure par diffusion

## 2-Absorptivité : mesure par diffusion



**2-Mesures d'absorptivités : détermination des puissances diffusées dans l'échantillon**

2-Mesures d'absorptivités : comparaisons des deux méthodes

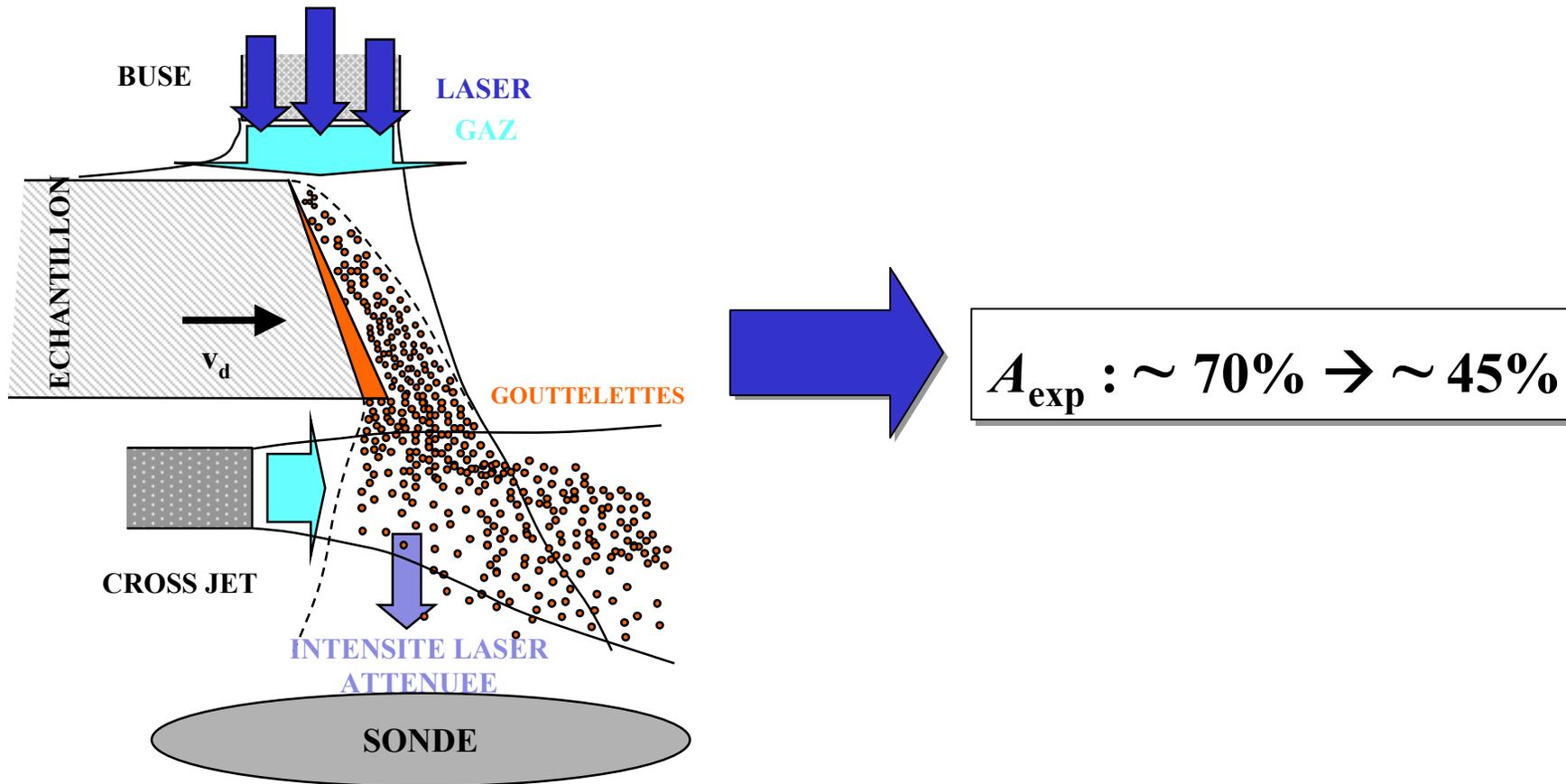
Méthode puissances transmises				Simulation
e(mm)	P <sub>0</sub> (W)	v <sub>d</sub> (mm/s)	A <sub>exp</sub> (%)	A <sub>th</sub> (%)
2	514	15	75	49,2
2	1240	47	60	38,6
4	1035	14	76	50
4	2003	40	67	43,6
6	2259	25	69	51,5

Méthode puissances diffusées				Simulation
e(mm)	P <sub>0</sub> (W)	v <sub>d</sub> (mm/s)	A <sub>exp</sub> (%)	A <sub>th</sub> (%)
2	1170	40	36	45
2	1170	47	42	43,3
4	2080	30	45	44,2
4	2080	40	49	44,1

20%-30% > A<sub>th</sub>

## 2-Mesures d'absorptivités : erreur sur la mesure de l'absorptivité

Mesures des puissances laser transmises :  
Surestimation de l'absorptivité



## 2-Mesures d'absorptivités : interprétation de l'accroissement de l'absorptivité

### Effets physiques potentiellement responsables de l'augmentation de l'absorptivité

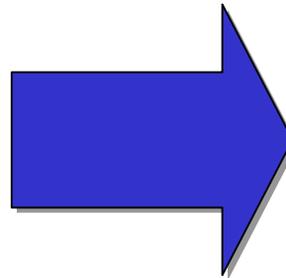
1-Rugosité moyenne et déformation de l'interface liquide-gaz

2-Oxydation partielle de surface

3-Changement de phase solide-liquide

4-Polarisation de l'onde laser

5-Multiréflexion laser



$$A_{\text{exp}} \in [1.2; 1.3] A_{\text{Fr}}$$



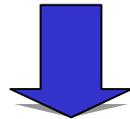
**Partie IV**  
**CONCLUSIONS**  
**ET**  
**PERSPECTIVES**

## 1-Conclusions

- ⊗ Mise en place d'un modèle 2D stationnaire de découpe de métaux par laser
- ⊗ Unification de tous les processus élémentaires

### Principe de fonctionnement

Paramètres opératoires d'entrée : Matériau,  $P_0$ ,  $v_d$ ,  $ppf$ ,  $p_0$ ,  $w_L$ ,  $M^2$ ,  $f$ ,  $h$



Auto-consistance partielle :  
 $r_s$  fixé expérimentalement

Profil géométrique 2D du front avant de découpe + Paramètres de sortie

- ⊗ Bonnes corrélations entre les résultats simulés et les données expérimentales de découpe  
Erreur relative maximale : 25%
- ⊗ Détermination de zones de stabilité de la découpe par l'utilisation d'une méthode inverse
- ⊗ Absorptivité expérimentale supérieure de 20% à 30% à l'absorptivité de Fresnel

## 2-Travail en cours et perspectives d'ordre théorique

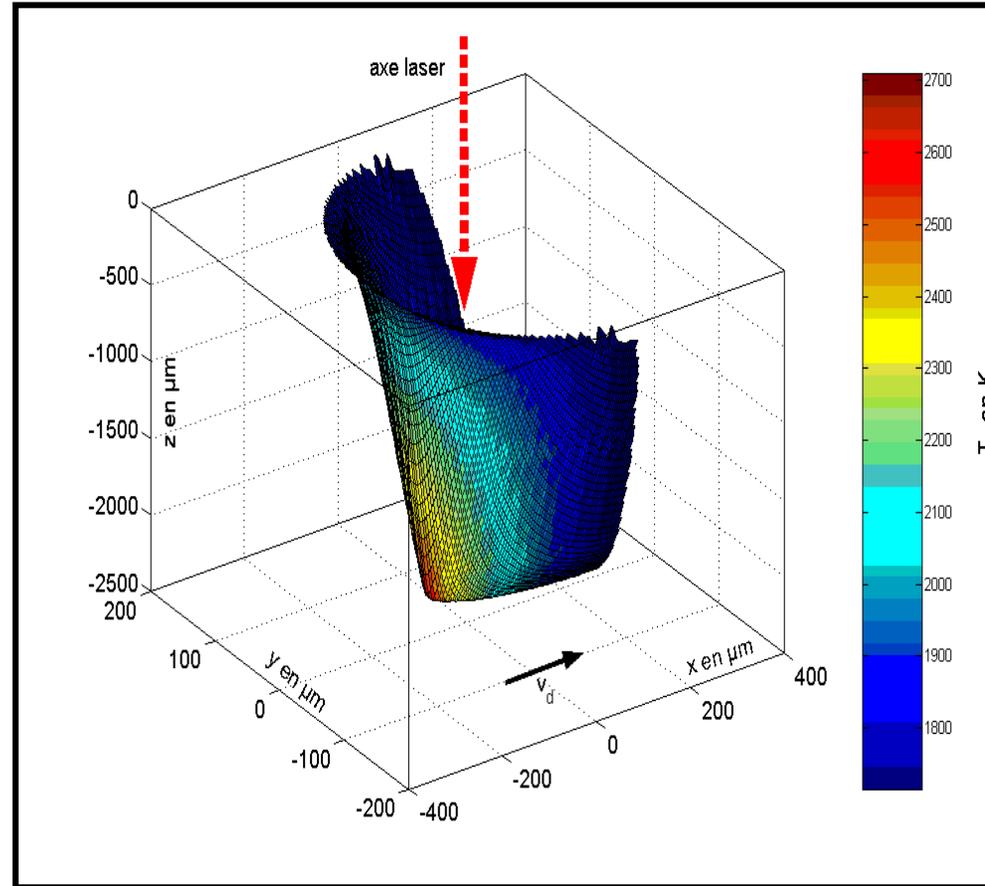
### A-Modélisation 3D de la saignée de découpe

Avantages : 1-modèle entièrement auto-consistant

2-calcul du rayon de la saignée

3-génère la géométrie complète de la saignée

Inconvénient : -temps de calcul beaucoup plus important



**B-Découpe active** : prise en compte de la réaction exothermique de l'oxygène avec le métal fondu

**C-Non-stationnarité du procédé de découpe laser** : génération des stries de découpe

### **3-Travail en cours et perspectives d'ordre expérimental**

- ⊗ **Systematiser les expériences de découpe : obtention d'abaques, consolidation du modèle**
- ⊗ **Étudier d'autres matériaux, changer de source laser (Nd-Yag)**
- ⊗ **Instrumenter des expériences de visualisation du front de découpe *in situ***
  - ➔ **étude de la non-stationnarité du processus de coupe**

