



Ablation d'une paroi solide par un jet chaud

Alexandre LECOANET
DEN/DTN/SMTA/LEAG – LEMTA

Nicolas RIMBERT, Michel GRADECK
LEMTA



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Frédéric PAYOT
DEN/DTN/SMTA/LEAG

GdR 2042 : TRANSINTER

16/12/2019

- Contexte
- Etudes existantes
- Apports et objectifs de l'étude
- Présentation dispositif expérimental
- Résultats
- Conclusion / perspectives

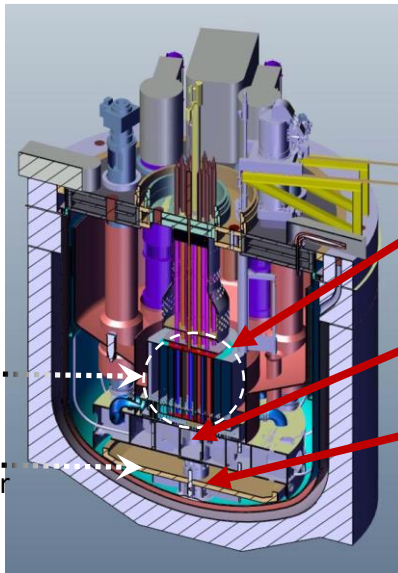


Contexte

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

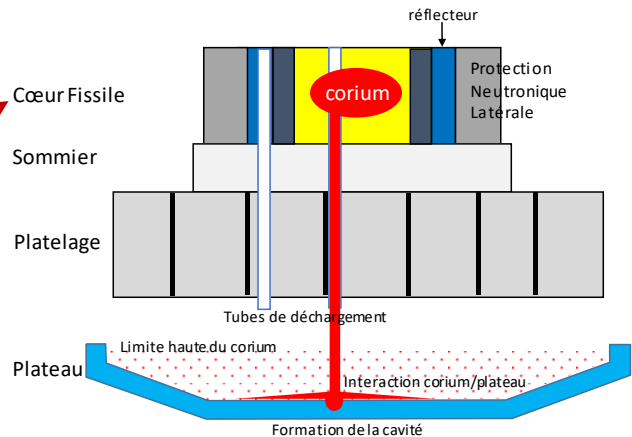
Sûreté des réacteurs de quatrième génération : réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na)

Coupe schématique du réacteur ASTRID



Zone fissile
Plateau
récupérateur

Situation accidentelle étudiée



Cœur Fissile
Sommier
Plateau

réflecteur

corium

Protection
Neutronique
Latérale

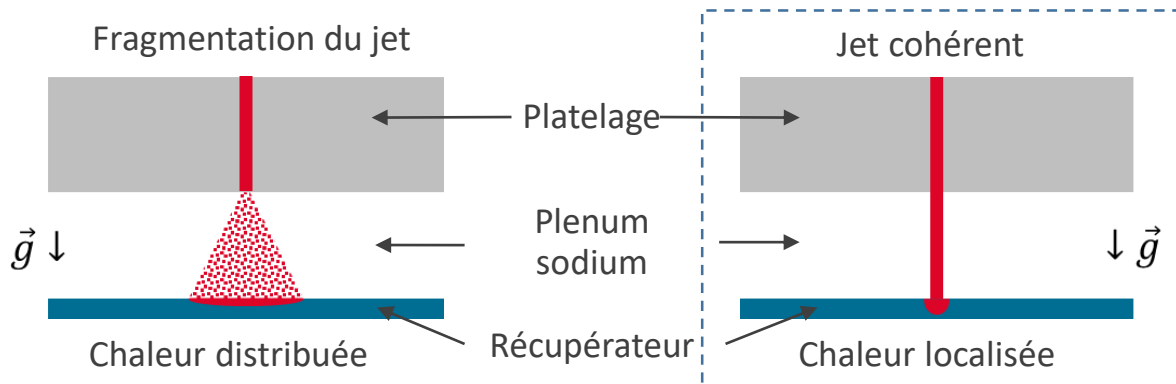
Tubes de déchargement

Limite haute du corium

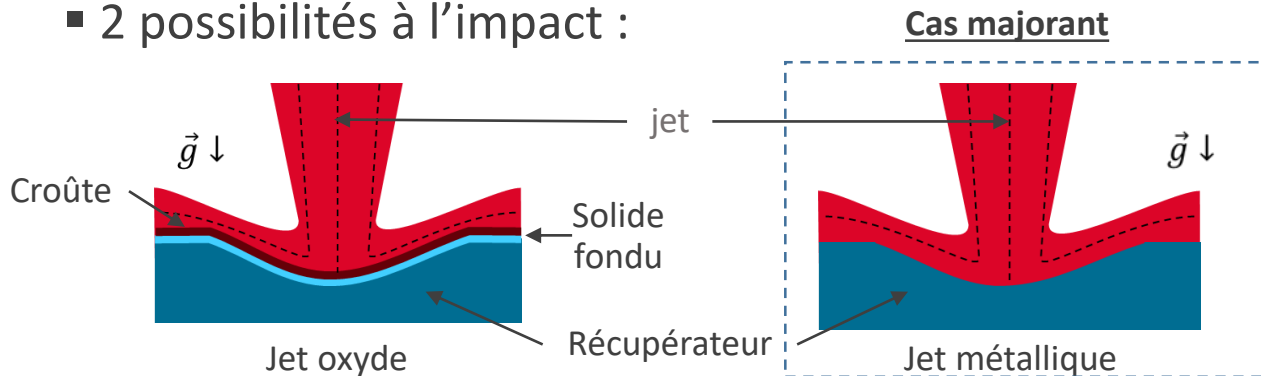
Interaction corium/plateau

Formation de la cavité

- 2 cas extrêmes en sortie de tube :



- 2 possibilités à l'impact :





Etudes existantes

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

■ Se basent sur le bilan suivant :

$$V_{fonte} = \frac{q_{jet}}{\rho_{solide} [L_{fusion,solide} + C_{p,solide} (T_{fusion,solide} - T_{ini,solide})]}$$

■ Etudes théoriques :

- Roberts (1958), Swedish et al. (1979), Furutani et al. (1991) :
 - Le solide fondu forme une fine couche d'épaisseur constante
 - q_{jet} est obtenu en résolvant le problème avec 2 couches limites

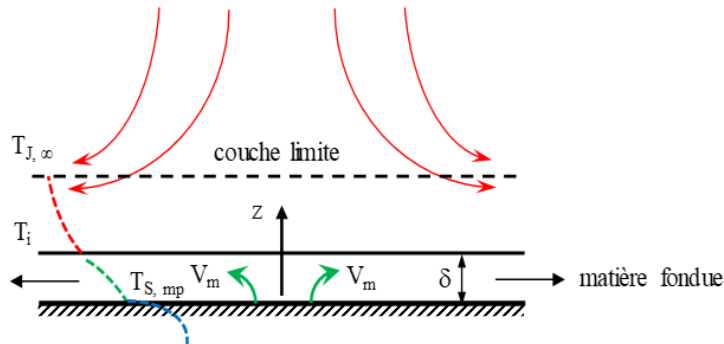


Image adaptée de Swedish
et al. (1979)

- Etudes semi-empiriques (jet et solide de même nature) :
 - Chaleur échangée

$$q_{jet} = h_{eff}(T_{jet} - T_{fusion,solide})$$

- h_{eff} obtenu expérimentalement
- Soit indirectement Swedish et al. (1979), Epstein (1975)

$$Nu_{fonte} = \frac{\ln(1 + B)}{B} Nu \quad B = \frac{C_{p,jet}(T_{jet} - T_{fonte,solide})}{L_{fusion,solide} + C_{p,solide}(T_{fusion,solide} - T_{ini,solide})}$$

- Soit directement en postulant Saito et al. (1990) (oxyde/métal), Sato et al. (1991) (métal/métal) :

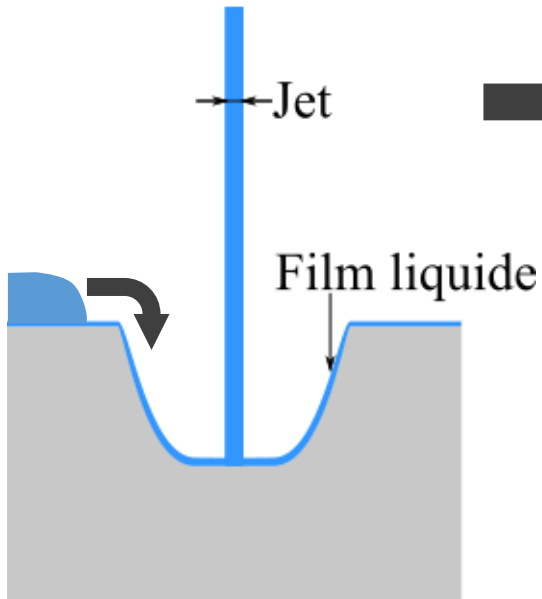
$$Nu_{fonte} = KRe^n Pr^m$$

$$Nu_{fonte} = \frac{h_{eff}d_{jet}}{k_{jet}} \quad Re = \frac{\rho_{solide}V_{jet}d_{jet}}{\mu_{jet}} \quad Pr = \frac{\mu_{jet}C_{p,jet}}{k_{jet}}$$

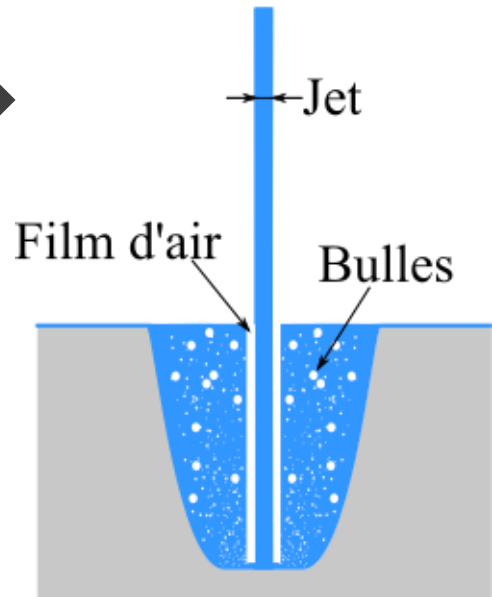
$$h_{eff} = \frac{V_{fonte}\rho_{solide}[L_{fusion,solide} + C_{p,solide}(T_{fusion,solide} - T_{ini,solide})]}{(T_{jet} - T_{fusion,solide})}$$

2 Régimes distingués par Saito et al. (1991)

Régime de film



Pool-effect



■ Apports :

- Fonte réduit les transferts thermiques,
- Informations sur la première phase de l'ablation,
- Evolution d'un film généré par impact jet axisymétrique,
- Décrit la possibilité d'au moins un autre régime d'ablation ;

■ Limitations :

- Parois de faibles épaisseurs,
- Pas de réelle description phénoménologique globale,
- Evolution film avec fonte par impact jet axisymétrique : non décrit,
- Vitesses d'ablation constantes ;



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Apports et objectifs de la thèse

- **Améliorer la compréhension** phénoménologique de l'ablation d'une paroi solide par un jet liquide,
- Etudier en détails l'effet de piscine, appelé « Pool-effect » pour comprendre et évaluer le phénomène,
- Obtenir des corrélations par des essais exp. ,
- Comparaison avec des outils de simulations mécanistes (TrioCFD),
- **Donner des éléments de dimensionnement du récupérateur de corium d'un futur Réacteur à Neutrons Rapides refroidi au Sodium européen,**
- **Qualifier des outils de calcul pour la démonstration de sûreté ;**

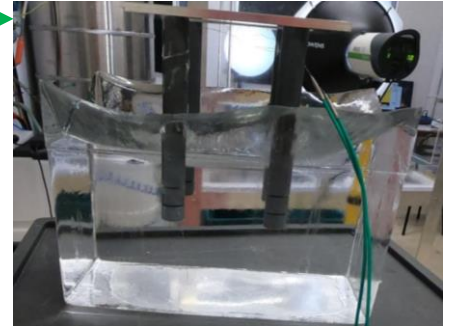
The CEA logo consists of the lowercase letters 'cea' in a white, rounded, sans-serif font. A thin green horizontal line is positioned directly beneath the letters.

Dispositif expérimental

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

■ Eau/Glace transparente :

- Visualisation directe du front d'ablation,
- Pas de formation de croûte,
- Sûr / peu onéreux,
- Viscosité semblable acier
($1.10^{-3} Pa.s$ contre $5.10^{-3} Pa.s$ pour l'acier),
- Conductivité thermique différente acier
($0,6 Wm^{-1}K^{-1}$ contre $50 Wm^{-1}K^{-1}$ pour l'acier) ;



■ Système expérimental :

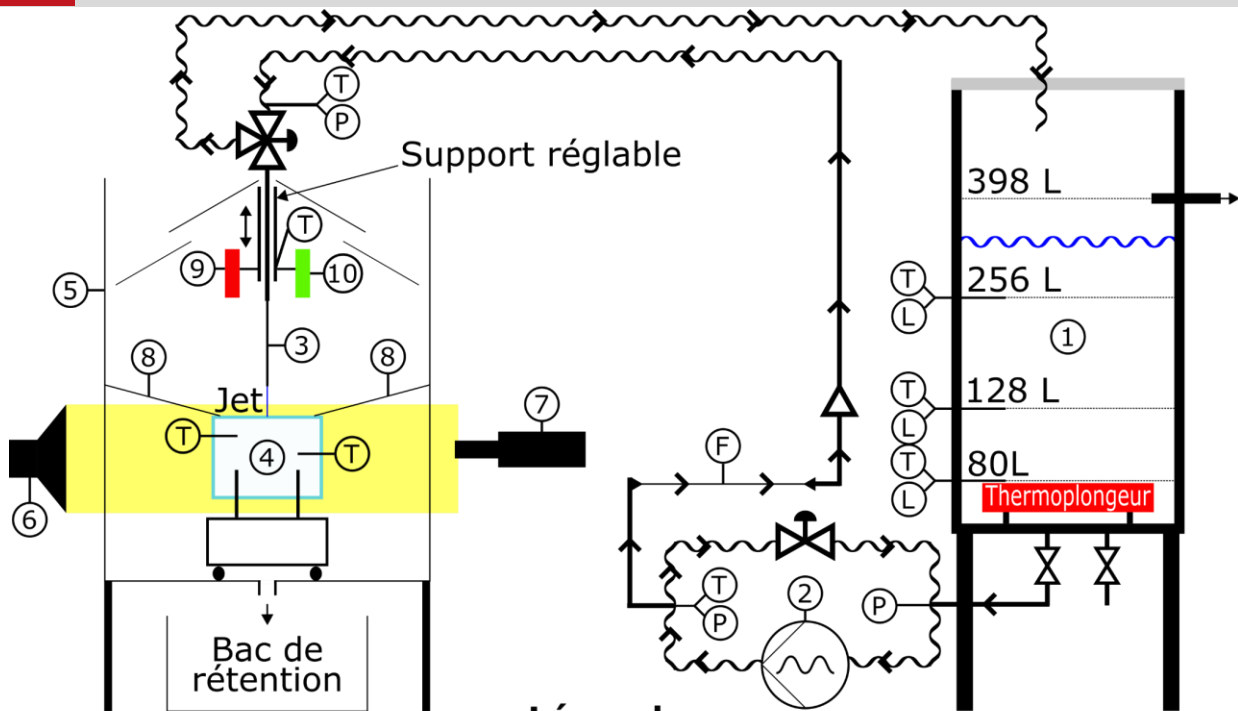
- Dispositif **HAnSoLO** (Hot Ablation of a SOLid by a Liquid – Observations)

- Paramètres d'entrée :

• Température	:	Ambiante – 80 °C	Thermocouples + IR
• Diamètre	:	3 mm – 10 mm	
• Vitesse jet	:	Jusqu'à 10 m/s	Débitmètre électromagnétique
• Inclinaison	:	Jusqu'à 80°	

- Instrumentation :

- Caméra rapide
- Caméra thermique (IR) coaxiale
- Caméra visible coaxiale



Légende :

F : Débitmètre

L : Niveau

P : Capteur pression

T : Thermocouple

1 : Cuve eau

2 : Pompe vis excentrée

3 : Buse

4 : Glace

5 : Enceinte

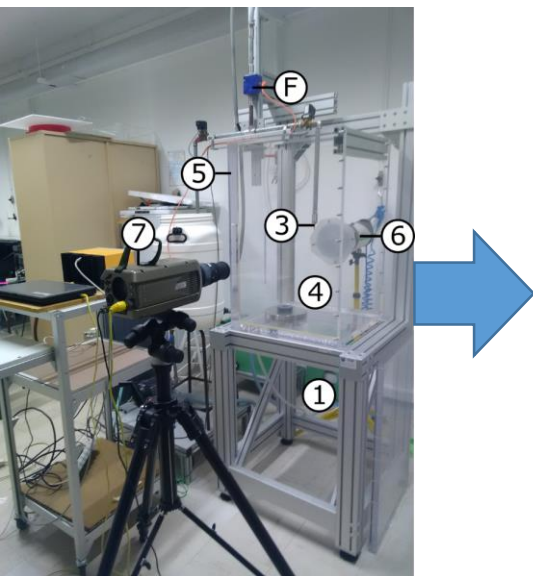
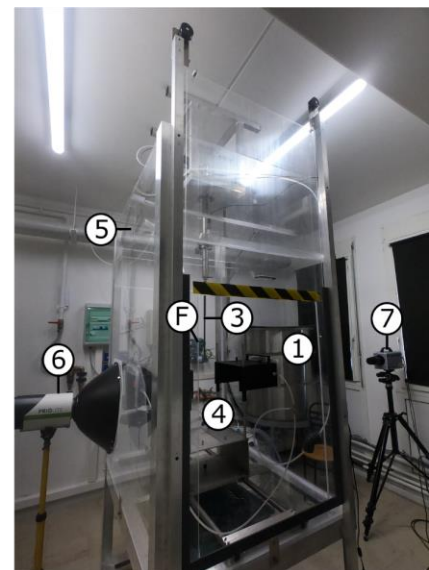
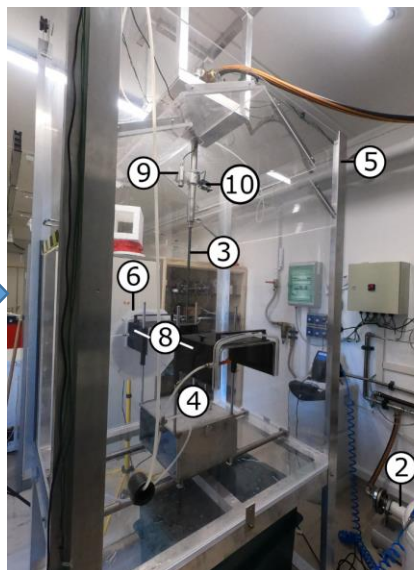
6 : Eclairage

7 : Caméra rapide

8 : Protection visu

9 : Caméra IR

10 : Caméra

JOLOHAnSoLO**Légende :**

F : Débitmètre

L : Niveau

P : Capteur pression

T : Thermocouple

1 : Cuve eau

2 : Pompe vis excentrée

3 : Buse

4 : Glace

5 : Enceinte

6 : Eclairage

7 : Caméra rapide

8 : Protection visu

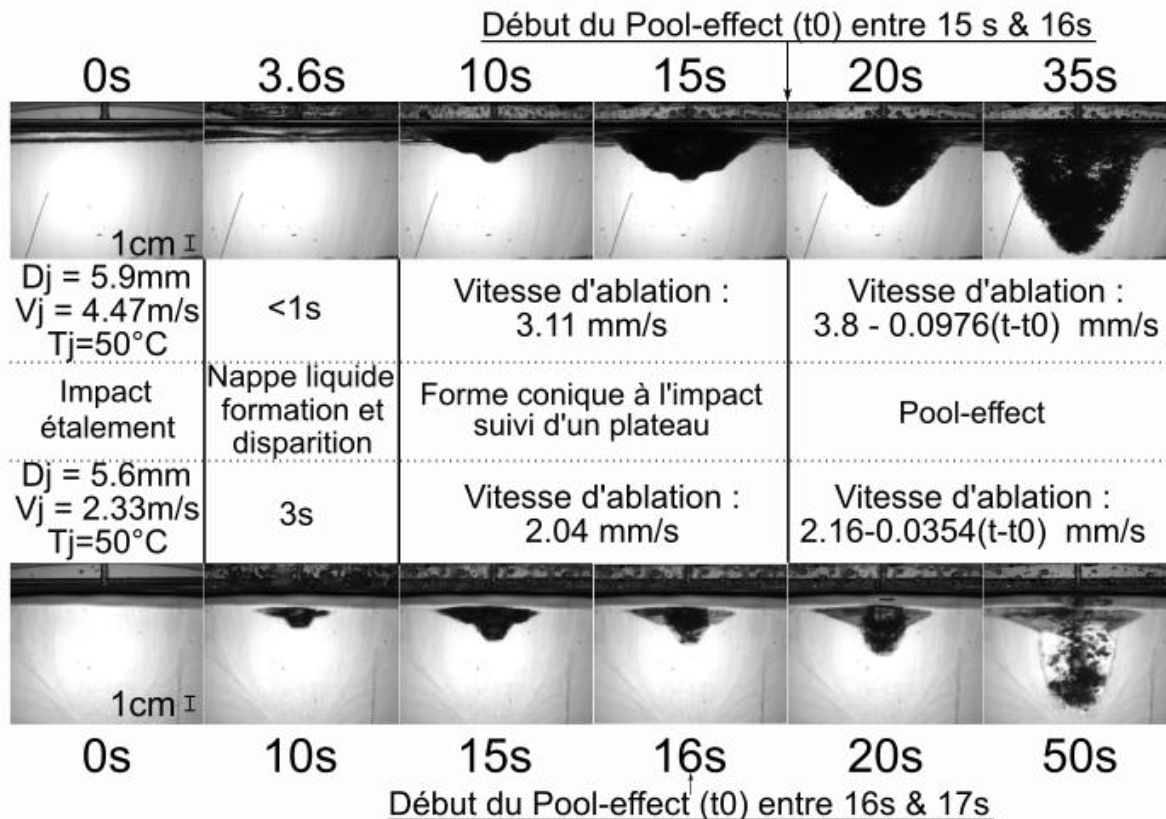
9 : Caméra IR

10 : Caméra



Résultats

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Paramètres expérimentaux :

$D_j = 6 \text{ mm}$ -- $T_j = 70^\circ\text{C}$ -- $V_j = 2,7 \text{ m/s}$ -- $Re = 40000$ -- $Pr = 2,56$ -- $T_s = 0^\circ\text{C}$

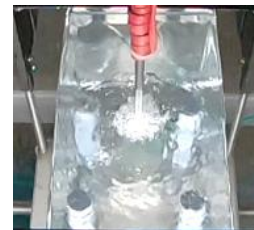
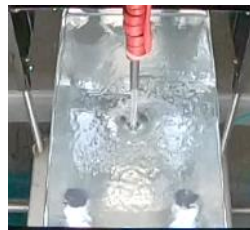
Impact + 1s

Impact + 4s
Nappe liquide

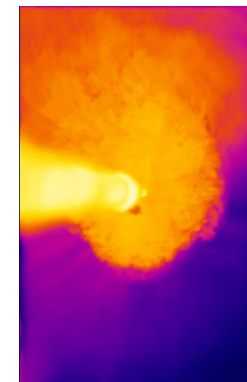
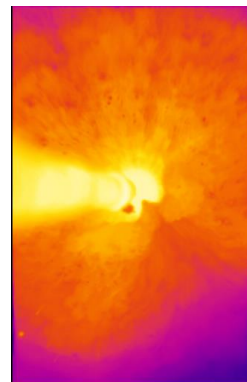
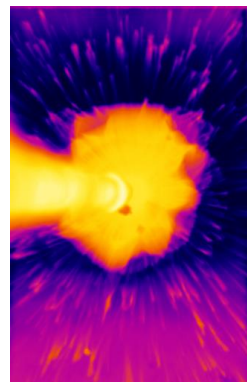
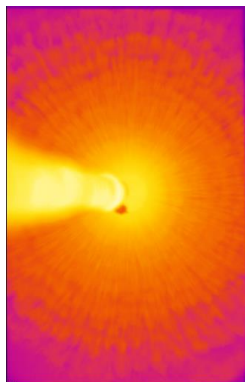
Impact + 10s25
Début « Pool-effect »

Impact + 11s
« Pool-effect »

GoPro



IR

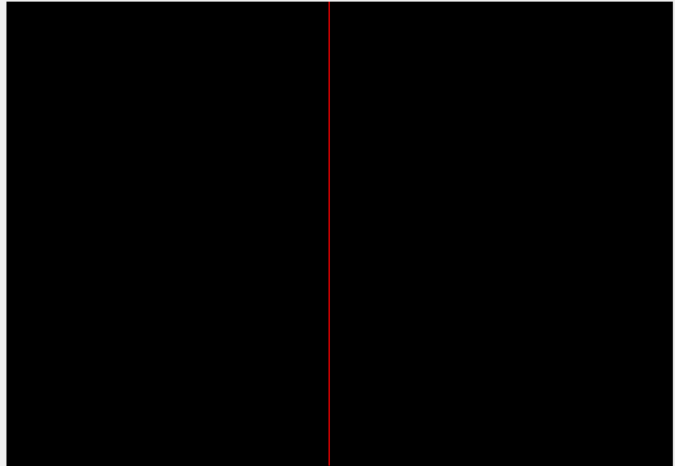


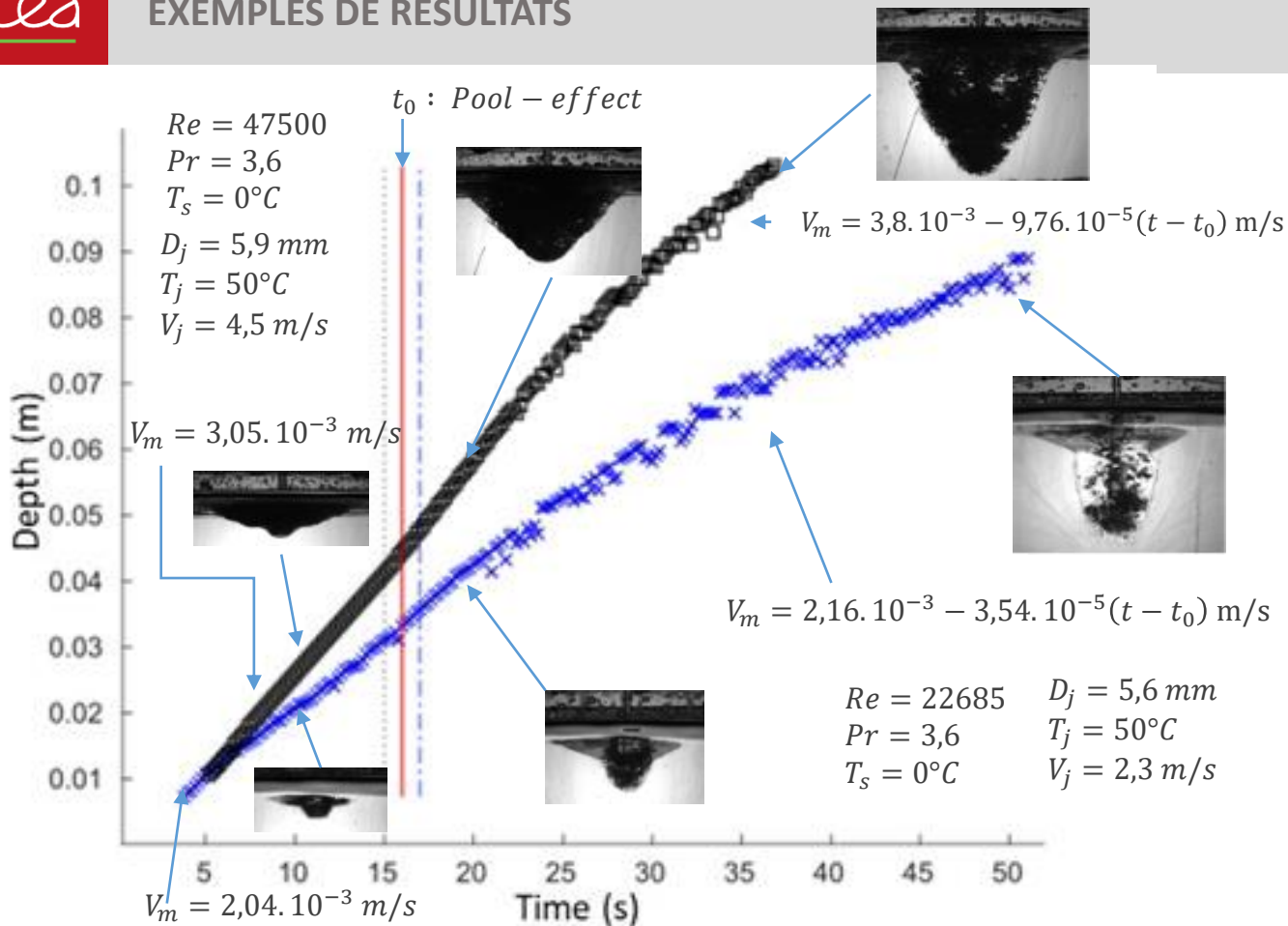
0,0

70,0

- **Logiciel** : Matlab
- **Procédure** :
 - Suppression du fond
 - Binarisation par seuillage
 - Suppression des artefacts
 - Détection de l'interface dans l'axe du jet
- **Détection « pool-effect »** via caméra rapide / GoPro / IR

- **Exemple** :
 - $D_j = 5,9mm$
 - $T_j = 50^\circ C$
 - $V_j = 4,47m/s$
 - $Re = 47481$
 - $Pr = 3,6$





Paramètres d'entrée					Paramètres de sortie					
V_j (m/s)	D_j (m)	T_j (°C)	Re_j	Pr_j	V_{m_1} (m/s)	t_0 (s)	V_{m_2} (m/s)	Nu Exp	Nu Sato et al.	Nu_{JOLO}
1.22	$4.0 \cdot 10^{-3}$	50	8786	3.6	$1.67 \cdot 10^{-3}$	16	$1,51 \cdot 10^{-3} - 2,21 \cdot 10^{-5}(t - t_0)$	63.5	180	78.4
2.33	$5.6 \cdot 10^{-3}$		22685		$2.04 \cdot 10^{-3}$		$2,16 \cdot 10^{-3} - 3,54 \cdot 10^{-5}(t - t_0)$	109	445	141
4.47	$5.9 \cdot 10^{-3}$		47481		$3.05 \cdot 10^{-3}$		$3,8 \cdot 10^{-3} - 9,76 \cdot 10^{-5}(t - t_0)$	171	850	216
7.57	$6.0 \cdot 10^{-3}$		81772		$3.88 \cdot 10^{-3}$		$4,63 \cdot 10^{-3} - 10,3 \cdot 10^{-5}(t - t_0)$	221	1401	299
10	$6.0 \cdot 10^{-3}$		108022		$4.96 \cdot 10^{-3}$		15	$6,90 \cdot 10^{-3} - 22,5 \cdot 10^{-5}(t - t_0)$	283	1810

$$Nu_{JOLO} = 0,0152 Re^{0,121} Pr^{0,6}$$

$$Nu_{Sato} = 0,0152 Re^{0,92} Pr^{0,8}$$

$$V_{fonte} = \frac{q_{jet}}{\rho_{solide} [L_{fusion,solide} + C_{p,solide} (T_{fusion,solide} - T_{ini,solide})]}$$

$$q_{jet} = h_{eff} (T_{jet} - T_{fusion,solide})$$

$$Nu = \frac{h_{eff} d_{jet}}{k_{jet}}$$

$$Re = \frac{\rho_{solide} V_{jet} d_{jet}}{\mu_{jet}}$$

$$Pr = \frac{\mu_{jet} C_{p,jet}}{k_{jet}}$$

- Tests réalisés : (20)

- 1 diamètre de buse : 6 mm
- 3 températures : 30°C, 50°C, 70°C

- 5 vitesses sortie buse:
1 m/s, 2,5 m/s, 5 m/s, 7,5 m/s, 10 m/s

Sato et al. 1991

$$D_j = 10 \text{ mm} \quad Re = 136000$$

$$T_j = 350^\circ\text{C} \quad Pr = 0,0113$$

$$V_j = 3,4 \text{ m/s} \quad T_s = 13^\circ\text{C}$$

Etain/Etain

Acier/Acier
316L

$$D_j = 18,8 \text{ mm} \quad Re = 95700$$

$$T_j = 1703^\circ\text{C} \quad Pr = 0,168$$

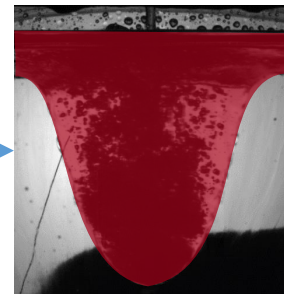
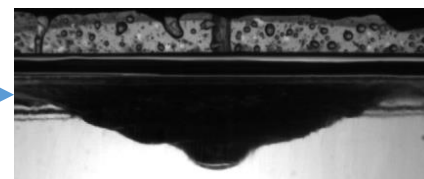
$$V_j = 3,1 \text{ m/s} \quad T_s = 22^\circ\text{C}$$

HAnSoLO

$$D_j = 5,9 \text{ mm} \quad Re = 47500$$

$$T_j = 50^\circ\text{C} \quad Pr = 3,6$$

$$V_j = 4,5 \text{ m/s} \quad T_s = 0^\circ\text{C}$$


 $t = 10\text{s}$

 $t = 35\text{s}$

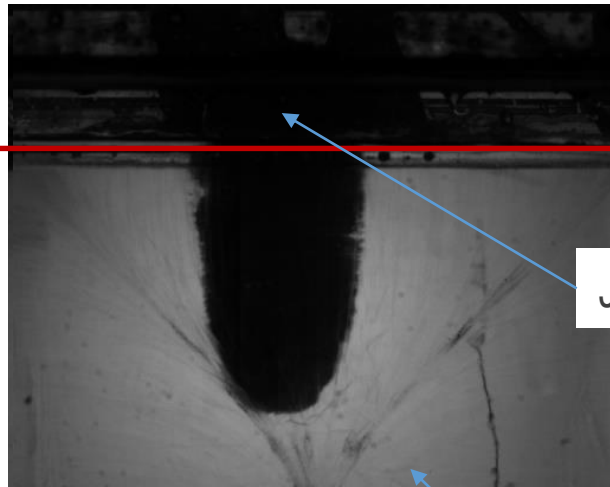
- 2 tests :
 - Différence qualité de glace
 - Paramètre d'entrée :

$$D_j = 6 \text{ mm} \quad Re = 146000$$
$$T_j = 70^\circ\text{C} \quad Pr = 2,56$$
$$V_j = 10 \text{ m/s} \quad T_s = 0^\circ\text{C}$$

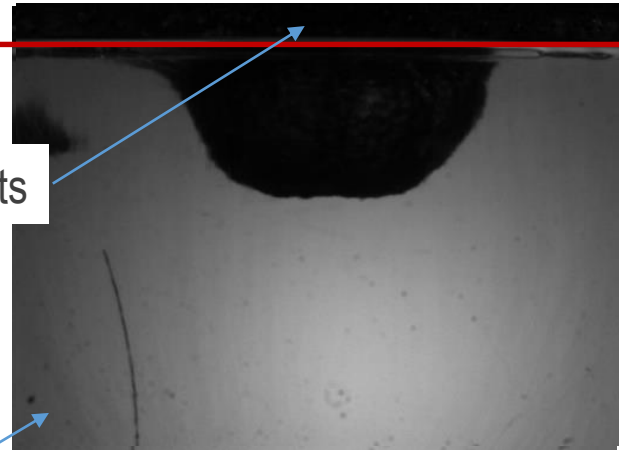
Glace avec défauts colonnaires

Temps : 6s

Surface



Glace sans défauts majeurs



Glace

Indentations de surface = augmentation vitesse de percement (Gilpin 1973)



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Conclusions & Perspectives

- Dans la courbe profondeur vs. temps :
 - 3 zones (jamais décrit) ;
- Une nappe liquide se forme et se fragmente,
- Le « pool-effect » s'accompagne :
 - d'un changement de forme de la cavité,
 - d'une réduction de vitesse d'ablation ;
- Lors du « pool-effect » la température du bain semble homogène à une profondeur donnée,
- Le critère de Saito et al. (1990) n'est pas suffisant pour prédire le « pool-effect » (4x diamètre du jet),
- Essais en eau et avec des métaux cohérents (Sato et al. 1991),
- L'état de surface influence le percement comme rapporté par Gilpin 1973

- Poursuite des campagne d'essais,
- Explication des différents régimes,
- Analyse des essais JIMEC :
 - Essais prototypiques Acier/Acier instrumentés TC (bloc) / Caméra rapide (jet)
- Simulations numériques (code TRIO CFD) ;



MERCI DE VOTRE ATTENTION

Alexandre LECOANET

GdR TransInter

16/12/2019