

GdR-FIBMAT 2025 – Adhésion de composites thermoplastiques. Caractérisation et modélisation pour des temps de contact courts.

WAROQUIER Pierre

7 novembre 2025

Encadrants LTeN :

Directeur de thèse : Steven LE CORRE

steven.lecorre@univ-nantes.fr

Co-Directeur de thèse : Jean-Luc BAILLEUL

jean-luc.bailleul@univ-nantes.fr

Co-Encadrant de thèse : Arthur LEVY

arthur.levy@univ-nantes.fr

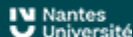
Encadrants IRT :

Référent IRT : Joël SERRA

joel.serra@irt-jules-verne.fr

Référent IRT : Erwan BERTEVAS

Erwan.bertevas@irt-jules-verne.fr



LE FUTUR
DE VOS USINES



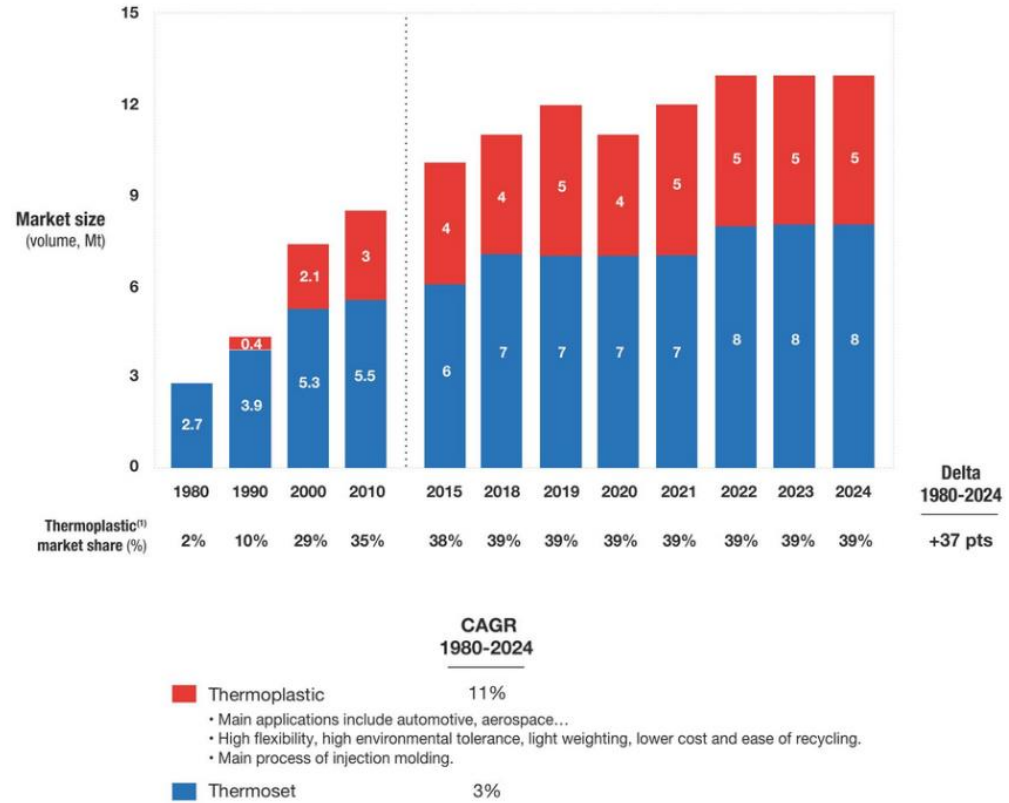
I – Contexte de l'étude et présentation de la thèse

I – Contexte de l'étude et présentation de la thèse

► I.a) Contexte général

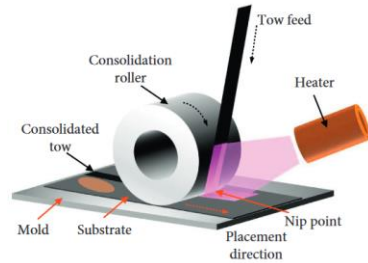
- Viscosité élevée
- Coûts d'achat et de production hauts

- Conditionnement stable à température ambiante
- Réutilisables / Recyclables
- Temps de mise en forme courts



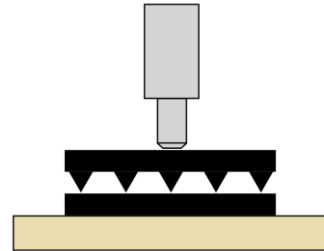
I – Contexte de l'étude et présentation de la thèse

► I.a) Contexte général



Automated Fiber Placement (AFP) [2]

~100ms



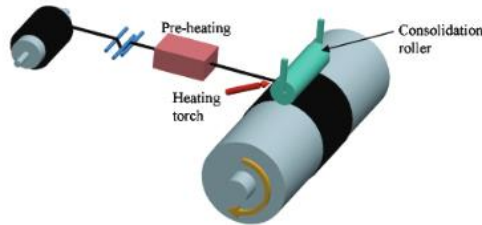
Soudage ultrason

~1s

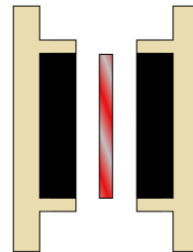


Surmoulage

~5s



Enroulement filamentaire [3]

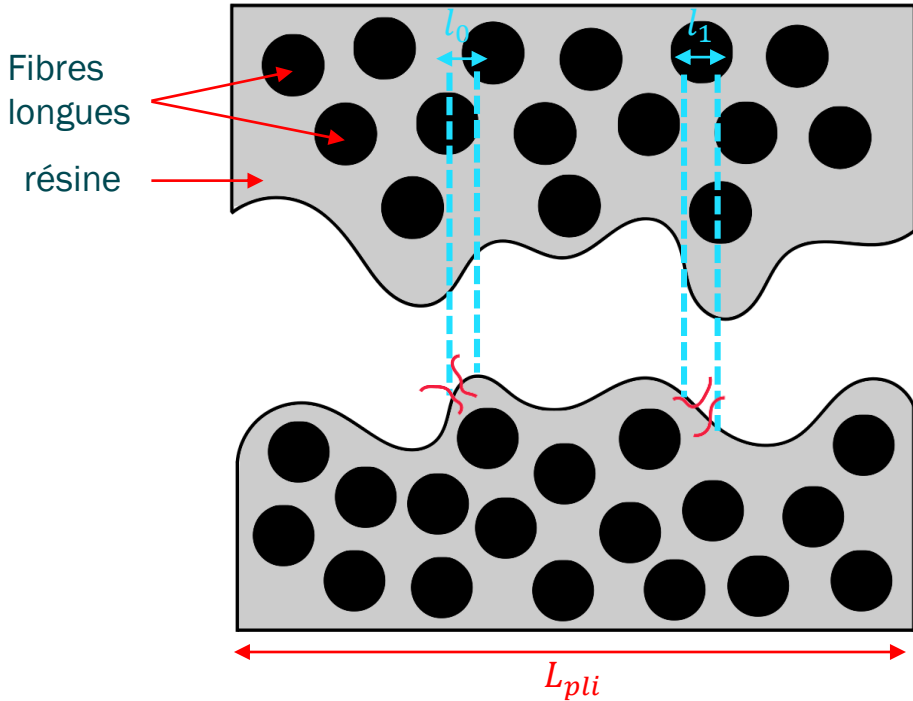


Soudage IR

→ Comprendre les phénomènes de l'adhésion pour des temps courts.

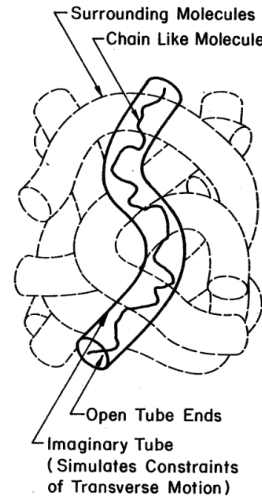
I – Contexte de l'étude et présentation de la thèse

► I.b) Les phénomènes physiques de l'adhésion

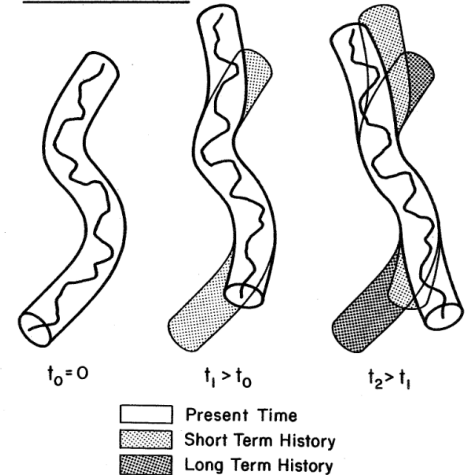


Le contact intime :

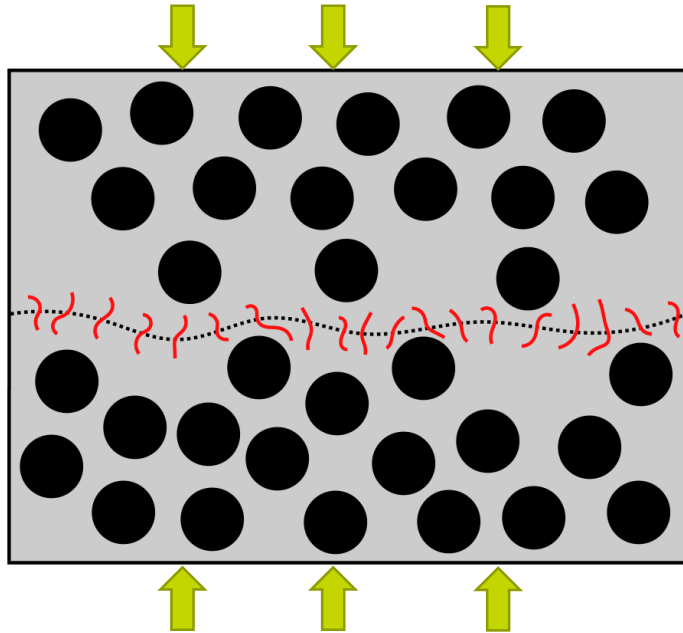
$$D_{ic}(t) = \frac{l(t)}{L_{pli}} \quad \text{avec ici } D_{ic}(0) = \frac{l_0 + l_1}{L_{pli}}$$



Reptation Theory



► I.b) Les phénomènes physiques de l'adhésion



La cicatrisation [7] :

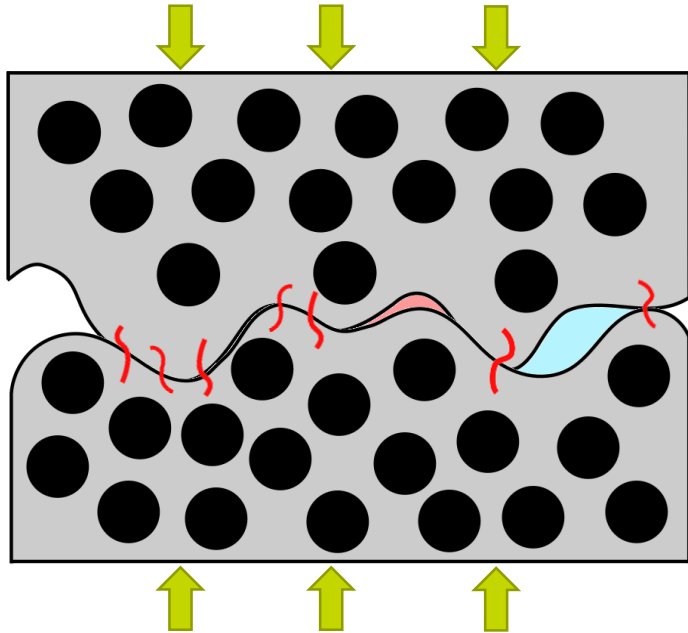
$$D_h(t) = \frac{\sigma(t)}{\sigma_\infty} \propto \left(\frac{t}{t_{rep}} \right)^{1/2}$$

→ Seulement valide pour $M < 8M_c$

$$D_h(t) = \frac{\sigma(t)}{\sigma_\infty} \propto \left(\frac{t}{t_w} \right)^{1/4} \quad \text{Avec } t_w < t_{rep}$$

$$D_h(t) \propto \left(\frac{t}{t_w} \right)^{1/4} \propto \left(\frac{G_{IC}(t)}{G_{IC,\infty}} \right)^{1/2}$$

► I.b) Les phénomènes physiques de l'adhésion



Couplage contact intime et cicatrisation [8] :

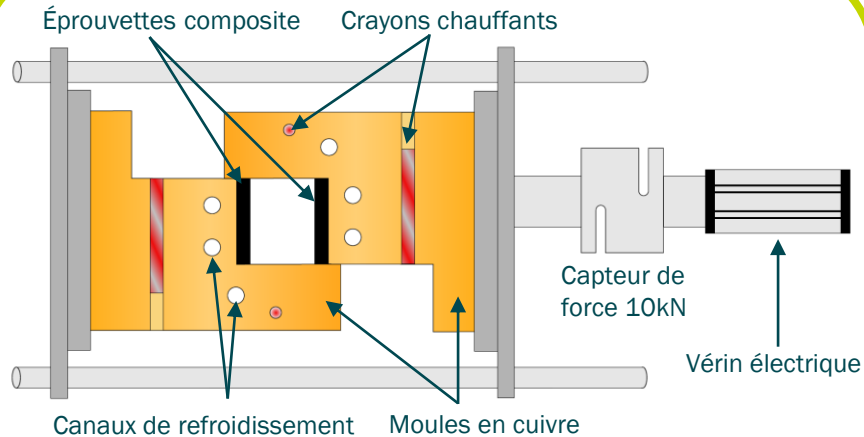
$$D_a(t) = D_{ic0} D_h(t) + \int_0^t D_h(t - \tau) \frac{dD_{ic}}{dt} d\tau$$

► I.c) Travaux antérieurs

Caractérisation isotherme de l'adhésion de stratifiés avec contrôle des paramètres procédés (P , T et t_c). [9]

SOUDAGE

ESSAI MÉCANIQUE

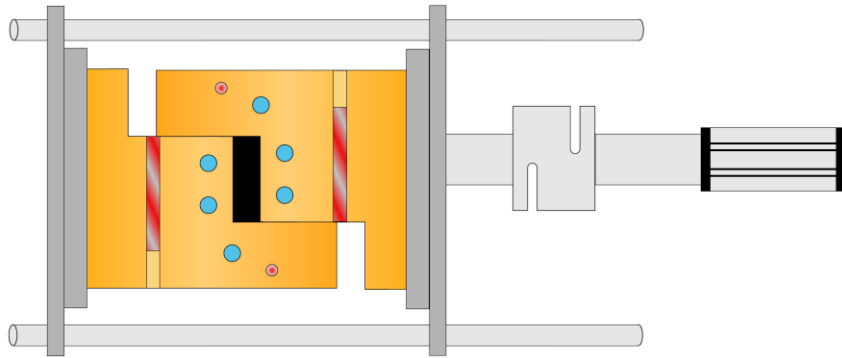


Thermo-Adhesion by COnductive heating of composite MAterials

► I.c) Travaux antérieurs

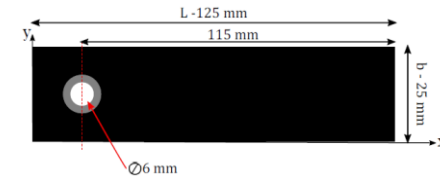
Caractérisation isotherme de l'adhésion de stratifiés avec contrôle des paramètres procédés (P , T et t_c). [9]

SOUDAGE



Thermo-Adhesion by **CO**nductive heating of composite **MA**terials

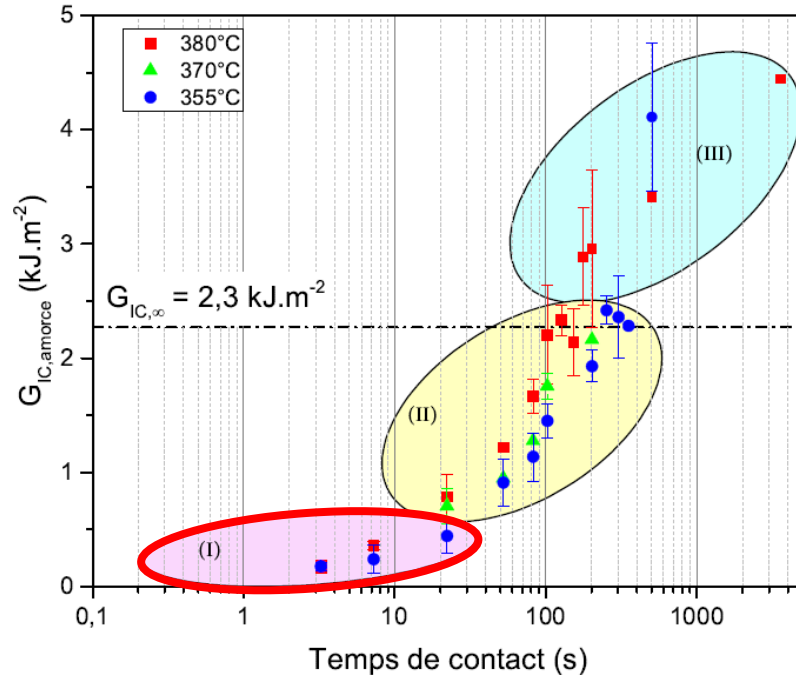
ESSAI MÉCANIQUE



Essai DCB en mode I

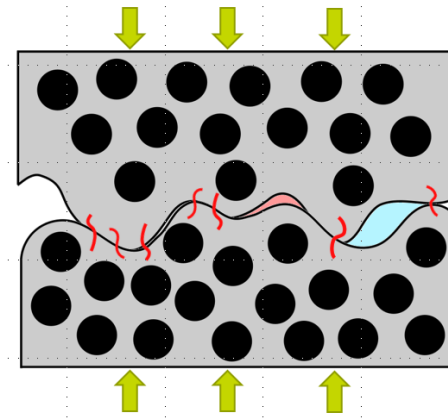


► I.c) Travaux antérieurs

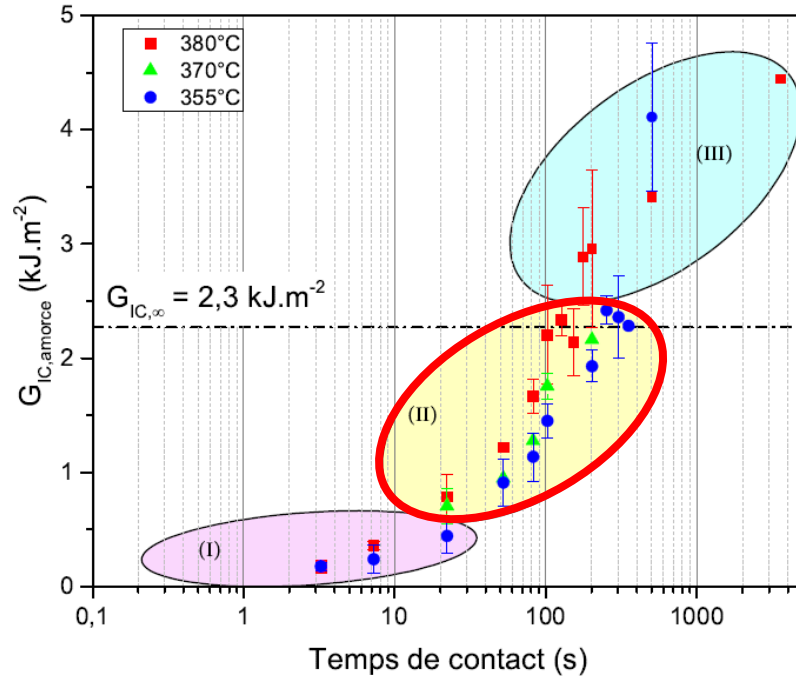


Régime I :

→ Développement du contact intime et cicatrisation partielle.

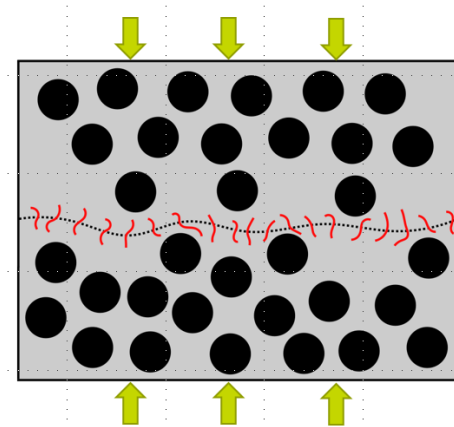


► I.c) Travaux antérieurs

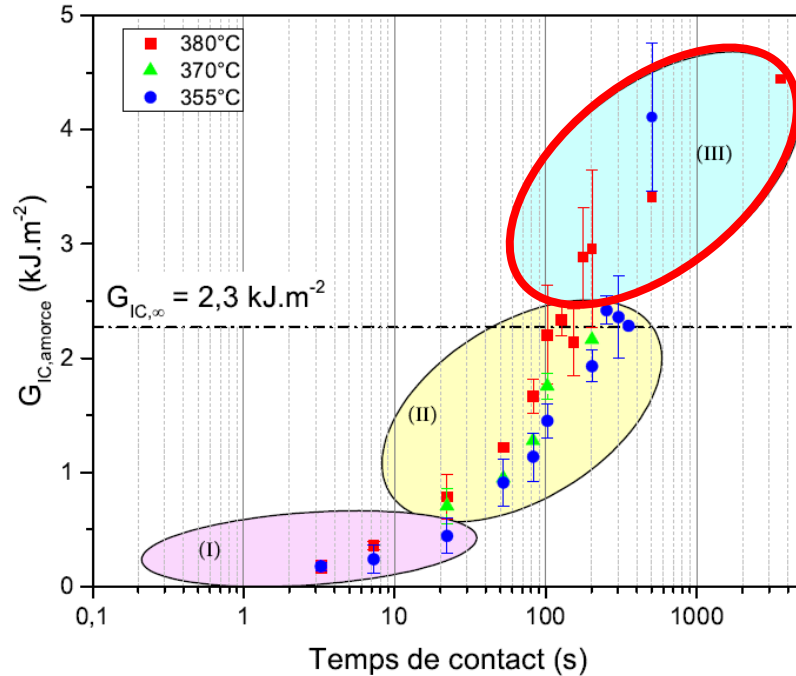


Régime II :

→ Cicatrisation pure.



► I.c) Travaux antérieurs



Régime I :

→ Développement du contact intime et cicatrisation partielle.

Régime II :

→ Cicatrisation pure.

Régime III :

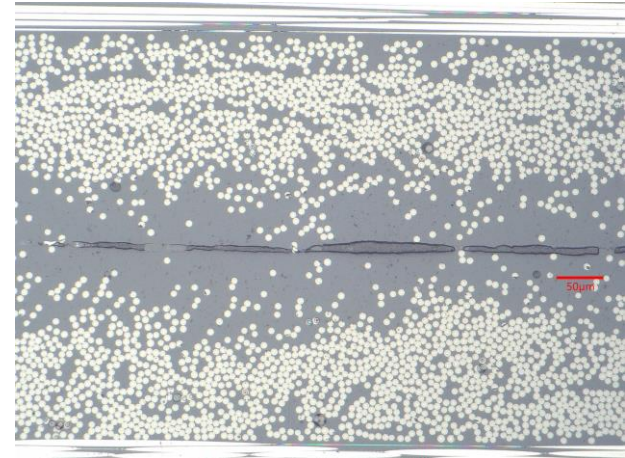
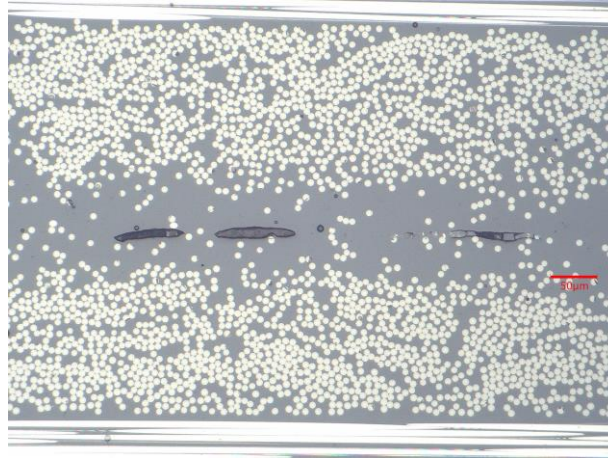
→ Phénomènes annexes, comme le pontage de fibres.

I – Contexte de l'étude et présentation de la thèse

► I.d) Matériau de l'étude et observations



Empilement : $[0,90]_{3S}$ + film d'enrichissement
60 μm . (LM-PAEK TC1225)



Soudage à 340 °C, 1,5 bar et 0,1s de temps de contact via TACOMA

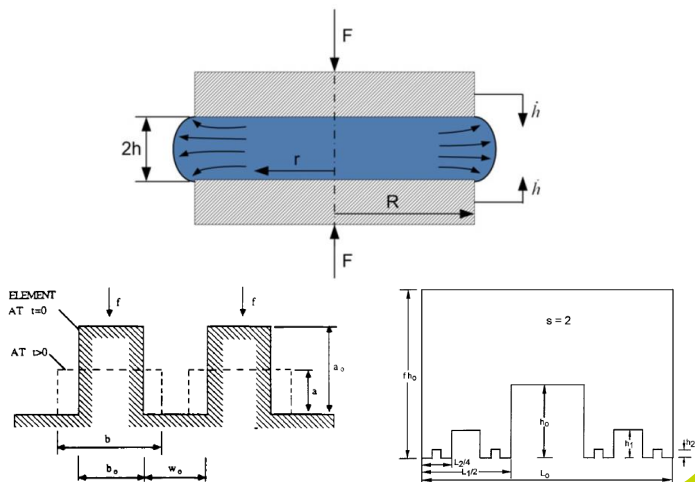


II – Modélisation du degré de contact intime

II – Modélisation du contact intime

► II.a) Les modèles analytiques pour le contact intime

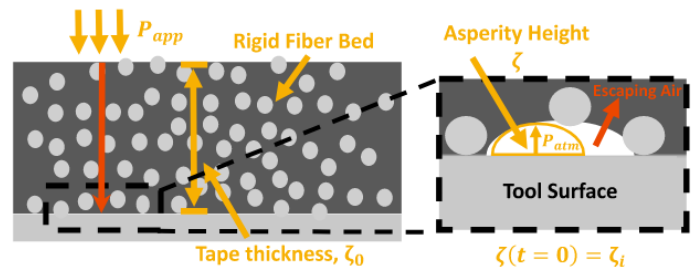
Les modèles squeeze flow



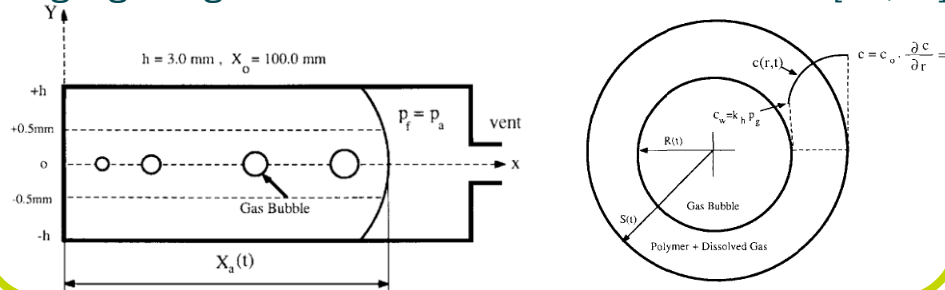
Mouillage [7]

$$D_{ic}(t) = \phi(t) = \phi_0 + (1 - \phi_0)(1 - e^{-kt^m})$$

« Percolation » de la résine (écoulement de Darcy)[11-13]



Piégeage de gaz et croissance de bulles à l'interface [14,15]

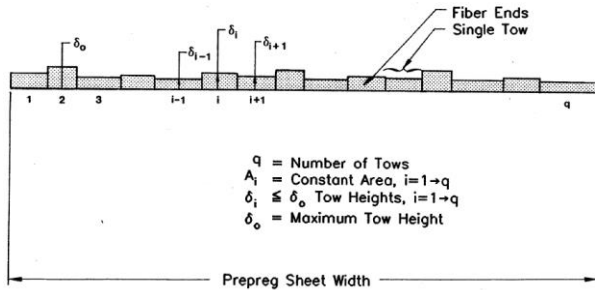
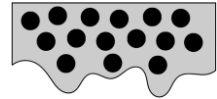


II – Modélisation du contact intime

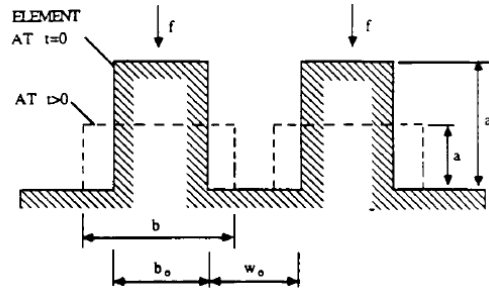
► II.a) Les modèles analytiques pour le contact intime

Le squeeze flow :

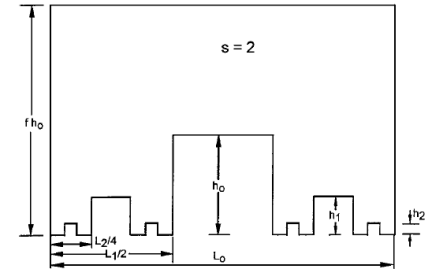
Prédire le degré de contact intime D_{ic} en fonction de P , T , et t_c .



Dara & Loos



Lee & Springer



Yang & Pitchumani

$$D_{ic} = \frac{1}{1 + \frac{w_0}{b_0}} \left[1 + \frac{5P_{app}}{\mu_{mf}} \left(1 + \frac{w_0}{b_0} \right) \left(\frac{a_0}{b_0} \right)^2 t \right]^{1/5}$$

$$D_{ic} = A \left(1 + B \frac{P_{app}}{\mu_{mf}(T)} t \right)^{1/5}$$

- ➔ Fluide newtonien
- ➔ Aspérités rectangulaires
- ➔ Hypothèse de lubrification

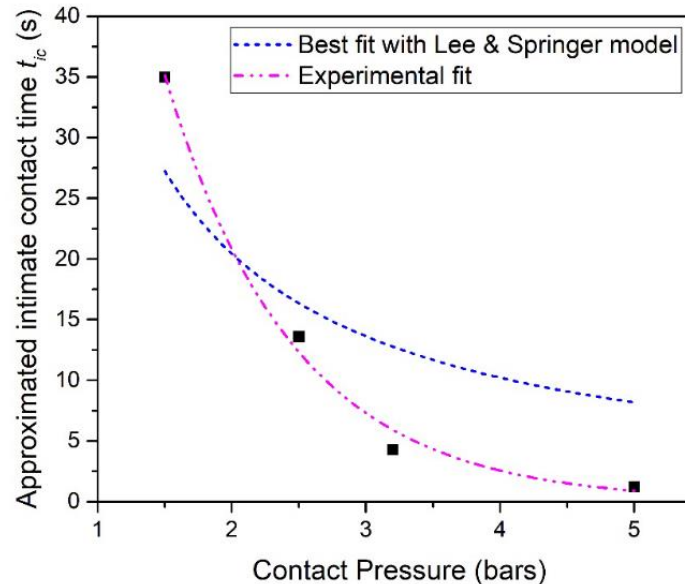
II – Modélisation du contact intime

► II.b) Les modèles analytiques pour le contact intime

En supposant que $D_{ic} = 1$

$$t_{ic} = \frac{\mu_{mf}}{5P_{app}} \frac{1}{1 + \frac{w_0}{b_0}} \left(\frac{b_0}{a_0}\right)^2 \left[\left(1 + \frac{w_0}{b_0}\right)^5 - 1 \right]$$

$$t_{ic} \propto \frac{\mu_{mf}}{P_{app}}$$

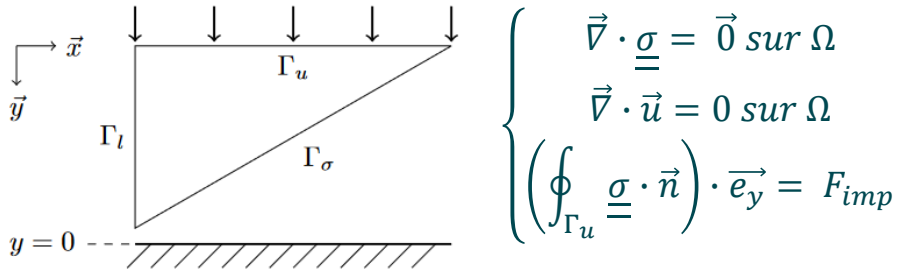


→ Hypothèses des modèles analytiques trop simplificatrices ?

II – Modélisation du contact intime

► II.c) Présentation du modèle éléments finis

Écoulement de Stokes ($R_e < 1$) :



- ➔ Géométries diverses et réelles,
- ➔ Modèle 2D et écrasement sur surface lisse,
- ➔ Fluide incompressible non-newtonien,

$$\mu = K \dot{\gamma}^{n-1}$$



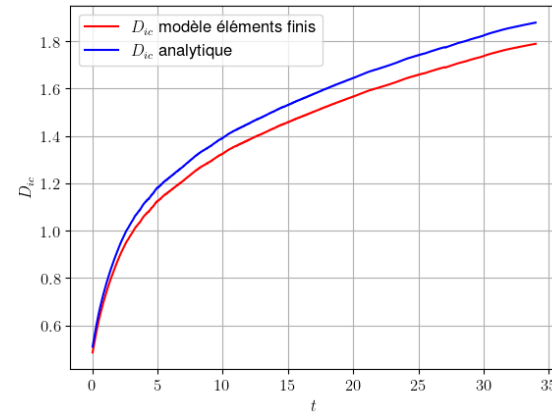
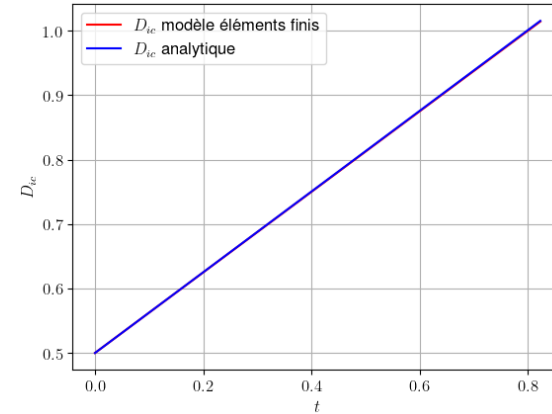
Contact par pénalisation explicite

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{f} = \vec{0} \text{ si } (y + u_y dt) > 0 \\ \vec{f} = -A(y + u_y dt)^2 \cdot \vec{e}_y \text{ sinon} \end{array} \right.$$



II – Modélisation du contact intime

► II.c) Présentation du modèle éléments finis



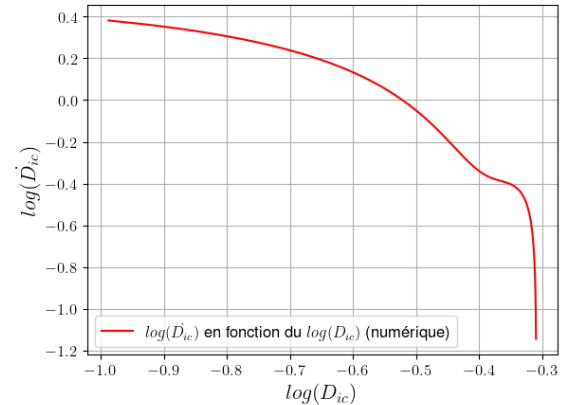
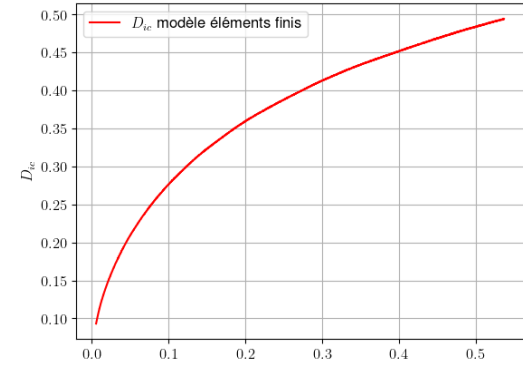
II – Modélisation du contact intime

► II.d) Premiers résultats

Squeeze flow newtonien en force imposée



$$\dot{D}_{ic} = AD_{ic}^n$$





III – Conclusion et perspectives

III Conclusion et perspectives

Conclusion :

- Contact intime important pour caractériser l'adhésion aux temps courts
- Modèles analytiques avec des hypothèses fortes
- Développement d'un modèle éléments finis pour description plus réaliste

Perspectives sur cette partie :

- Ajout d'autres physiques au modèle (mouillage, piégeage d'air)
- Exploitation du modèle sur des géométries réelles issues de la profilométrie
- Caractérisation pour confrontation du code au modèle EF et aux modèles analytiques



LE FUTUR
DE VOS USINES

Merci pour votre écoute

IRT JULES VERNE

1 mail des 20 000 Lieues
44 340 Bouguenais, France
contact@irt-jules-verne.fr

WWW.IRT-JULES-VERNE.FR

Rejoignez-nous sur :

