

Procédés de mise en forme
Le procédé d'injection thermoplastique
Département Matériaux
MAPI/Composites
2023-2024

vincent.sobotka@univ-nantes.fr

Démarche ingénieur: être capable, à partir d'hypothèses raisonnables et justifiées, de proposer un modèle analytique simple permettant de quantifier les transferts de chaleur et de prédire les évolutions de température.

Application: Procédé de mise en forme de pièces thermoplastiques.

Pré-requis:

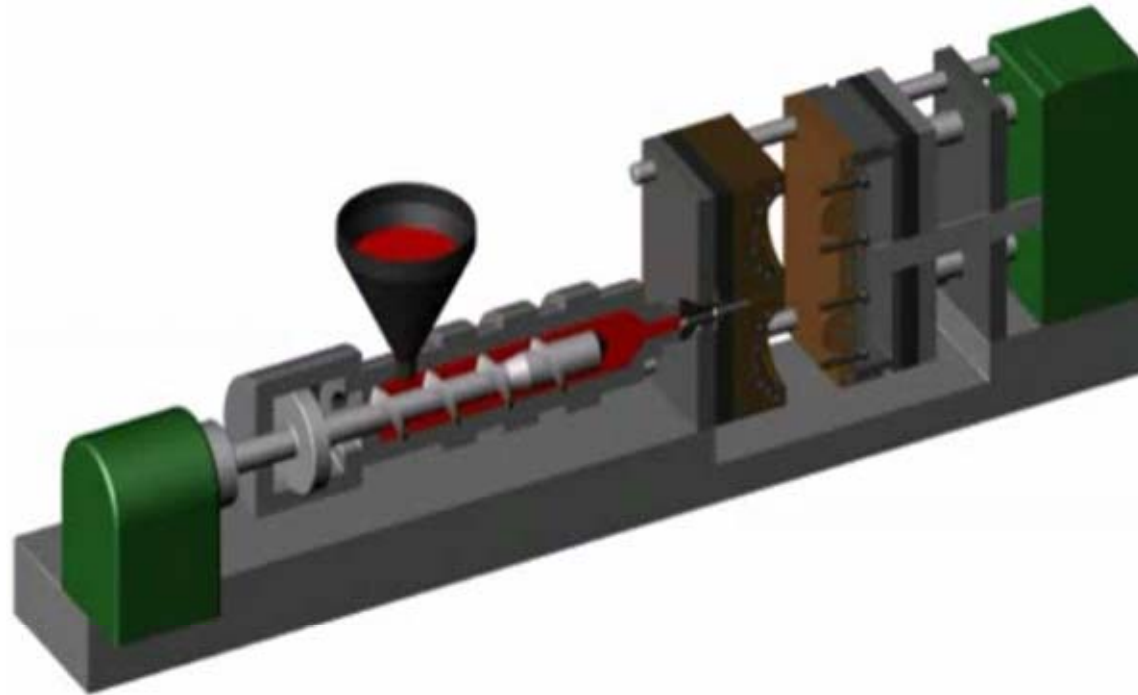
- Connaissance technologique du procédé
- Connaissance des matériaux thermoplastiques.
- Transferts de chaleur par conduction.
- Résolution mathématique d'équations différentielles.

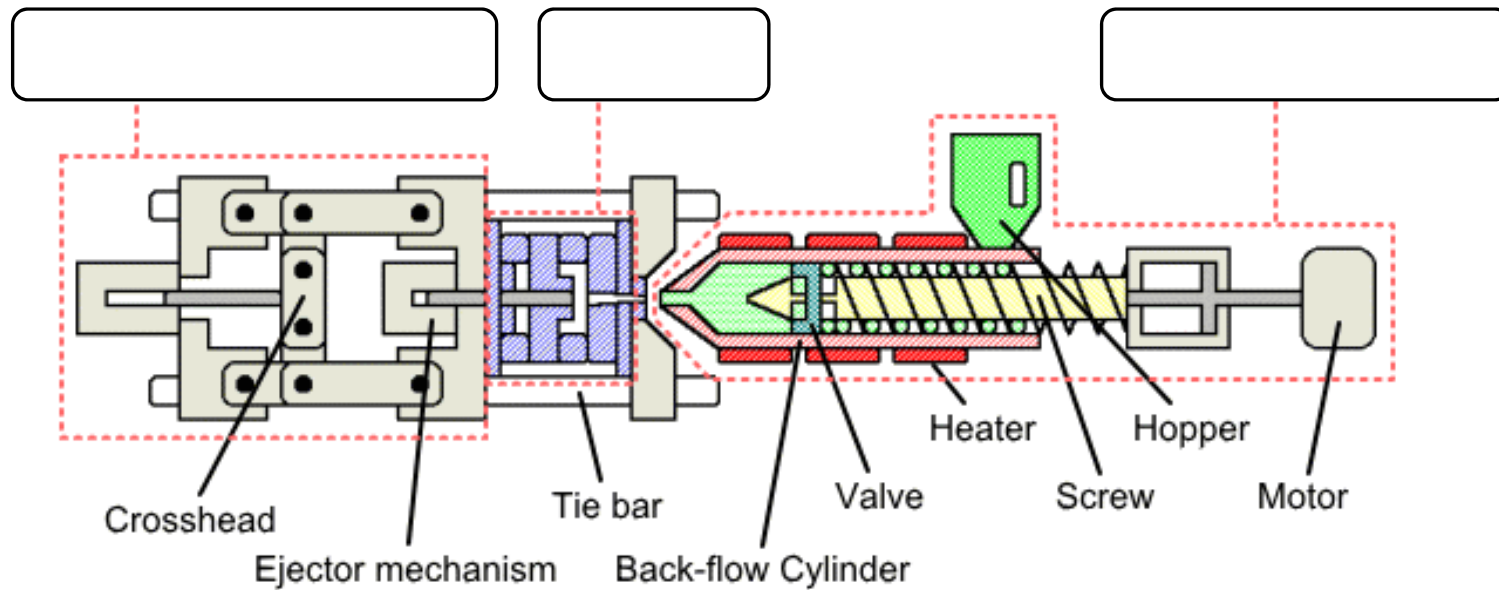
- I. Le procédé d'injection thermoplastique: technologie**
- II. Analyse expérimentale d'un cycle.**
- III. Modélisation des transferts dans le polymère pendant un cycle.**
- IV. Approche analytique des transferts de chaleur: injection des polymères amorphes.**

I. Le procédé d'injection thermoplastique: technologie



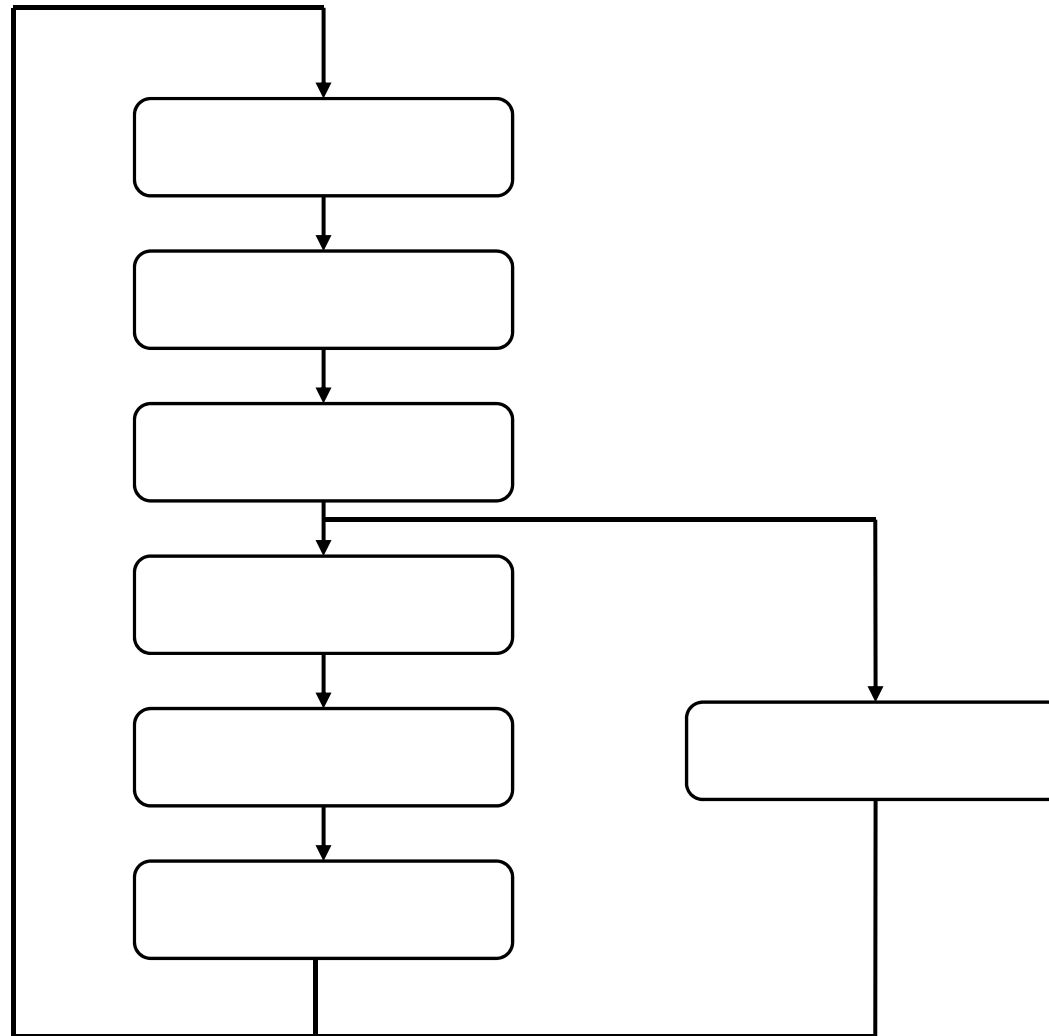
Quelles sont les fonctions de la presse à injecter?



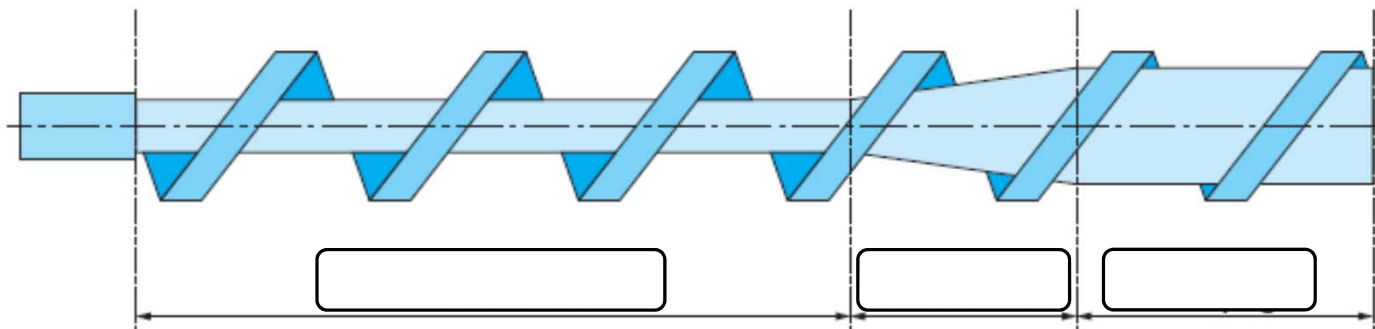


Copyright © POLYPLASTICS CO., LTD

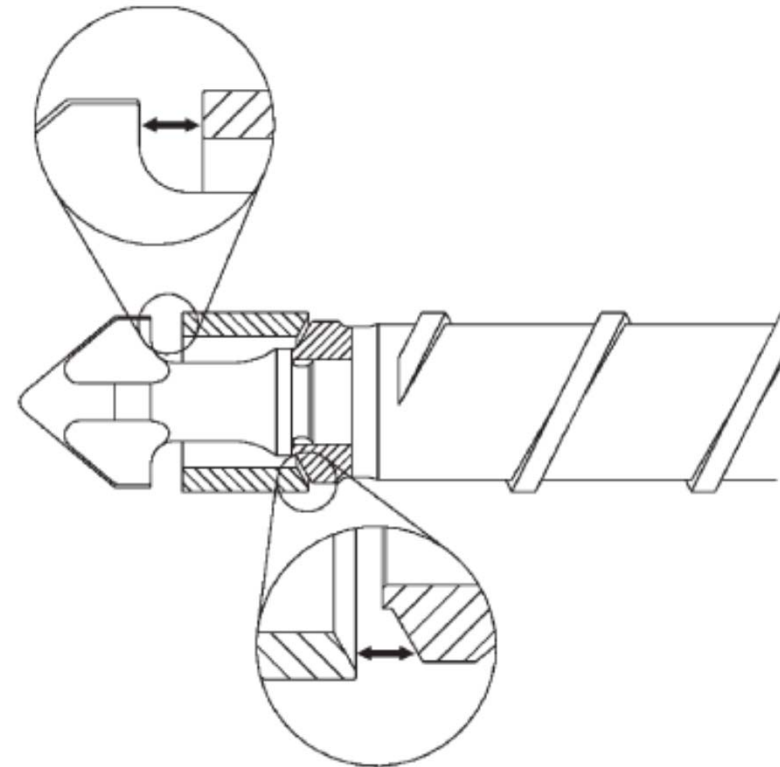
Quelles sont les zones de la presse à injecter?



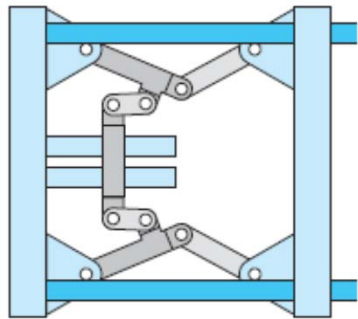
Vis du groupe d'injection



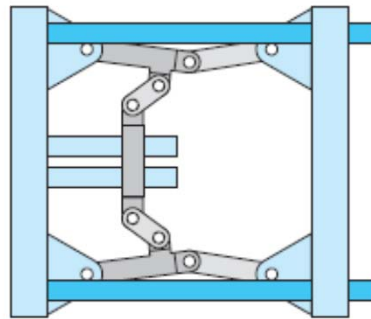
Le clapet anti-retour



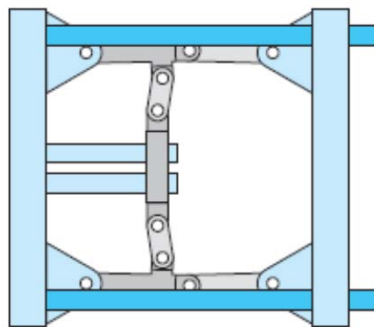
Système mécanique



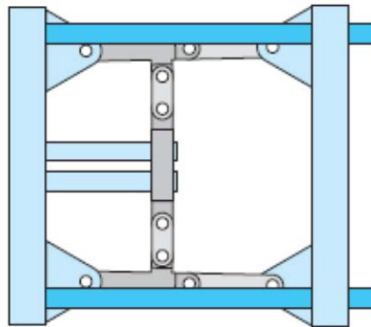
Position ouverte



Au cours de la fermeture



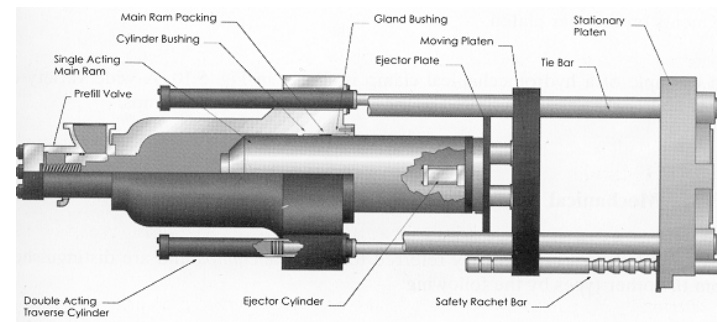
Début du verrouillage

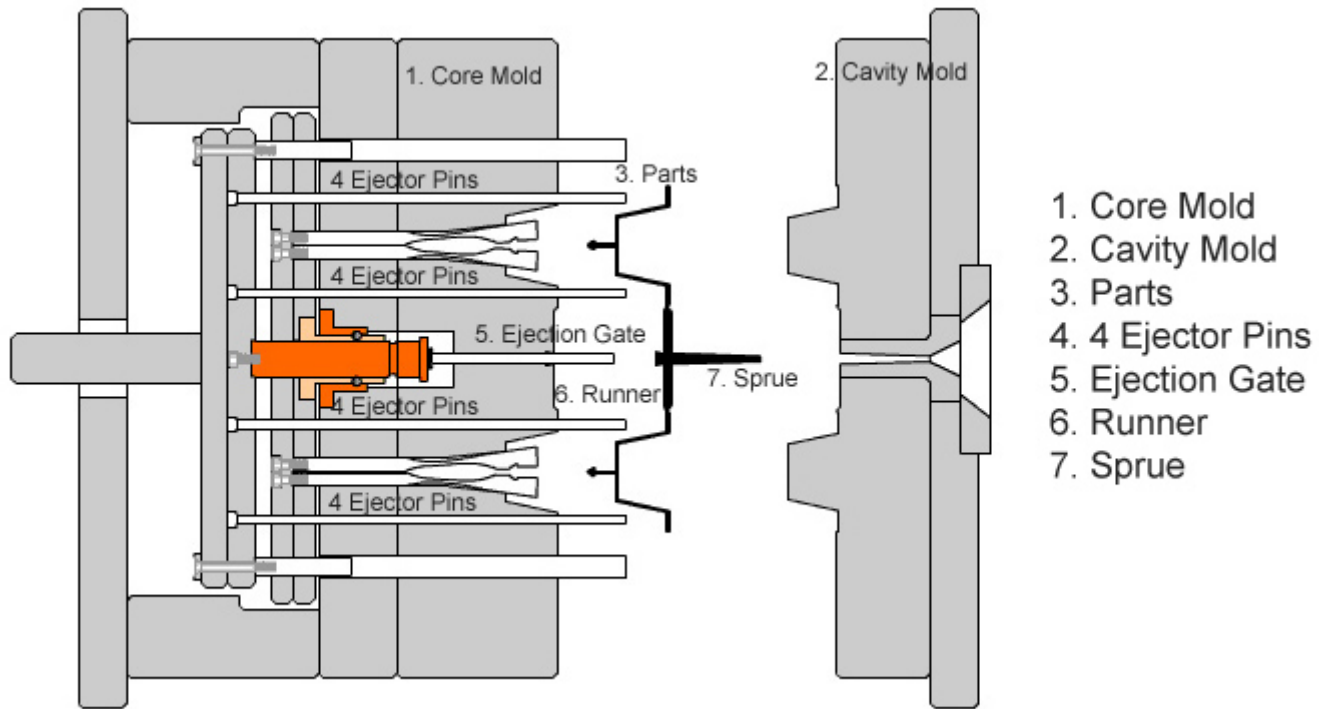


Fin du verrouillage

Fermeture à genouillère

Système hydraulique



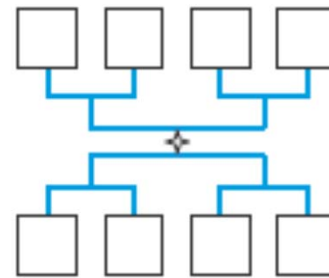
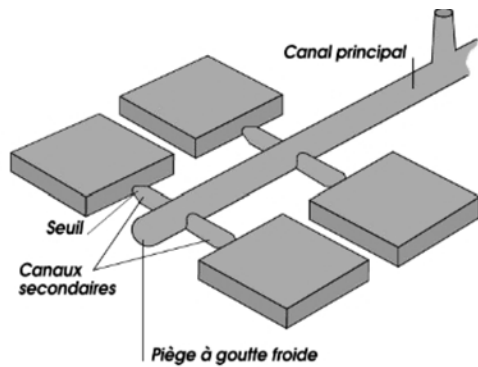


1. Core Mold
2. Cavity Mold
3. Parts
4. 4 Ejector Pins
5. Ejection Gate
6. Runner
7. Sprue

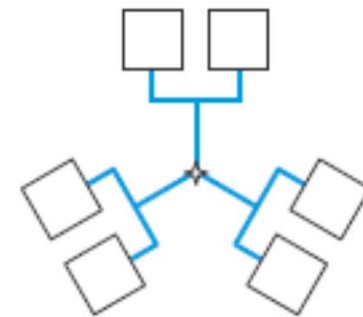
Multi empreintes



Disposition des canaux d'alimentation

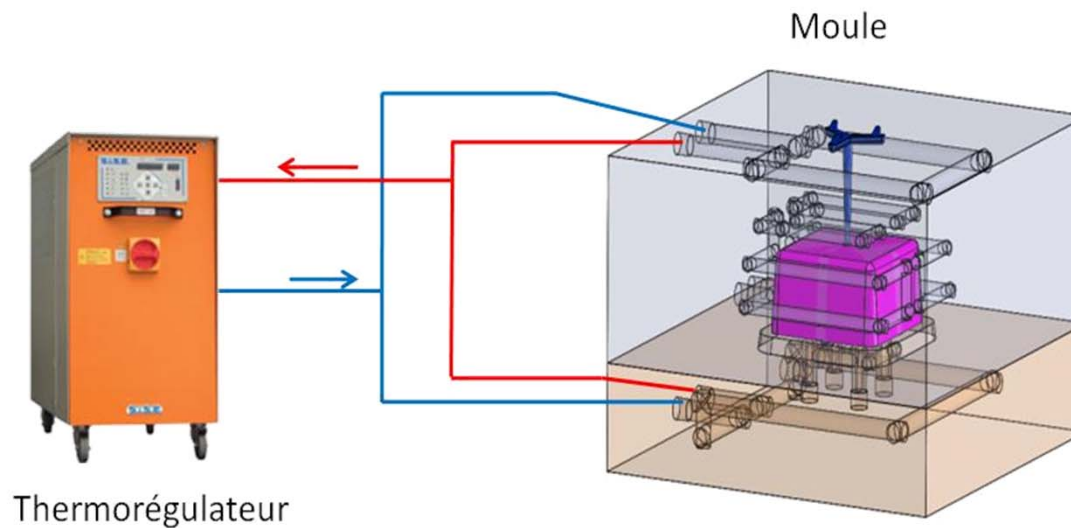


(a) symétrique



(b) en étoile

Régulation thermique



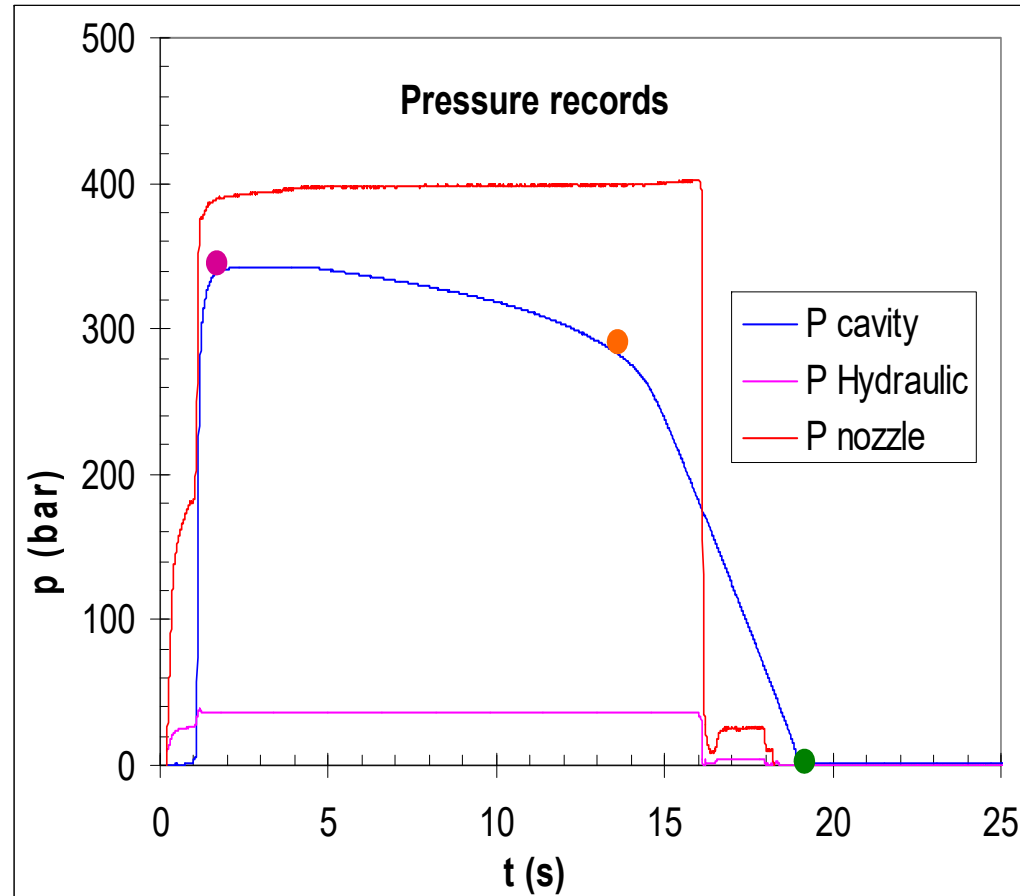
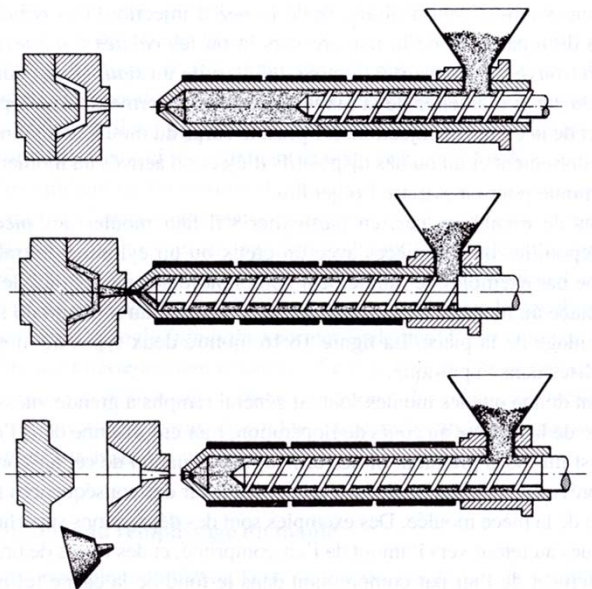
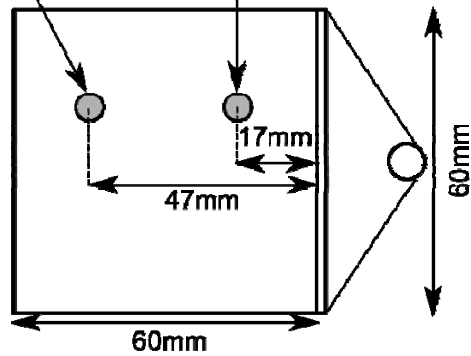
Mais souvent thermique dernier point abordé:
canaux positionnés dans les espaces libres

II. Analyse expérimentale d'un cycle

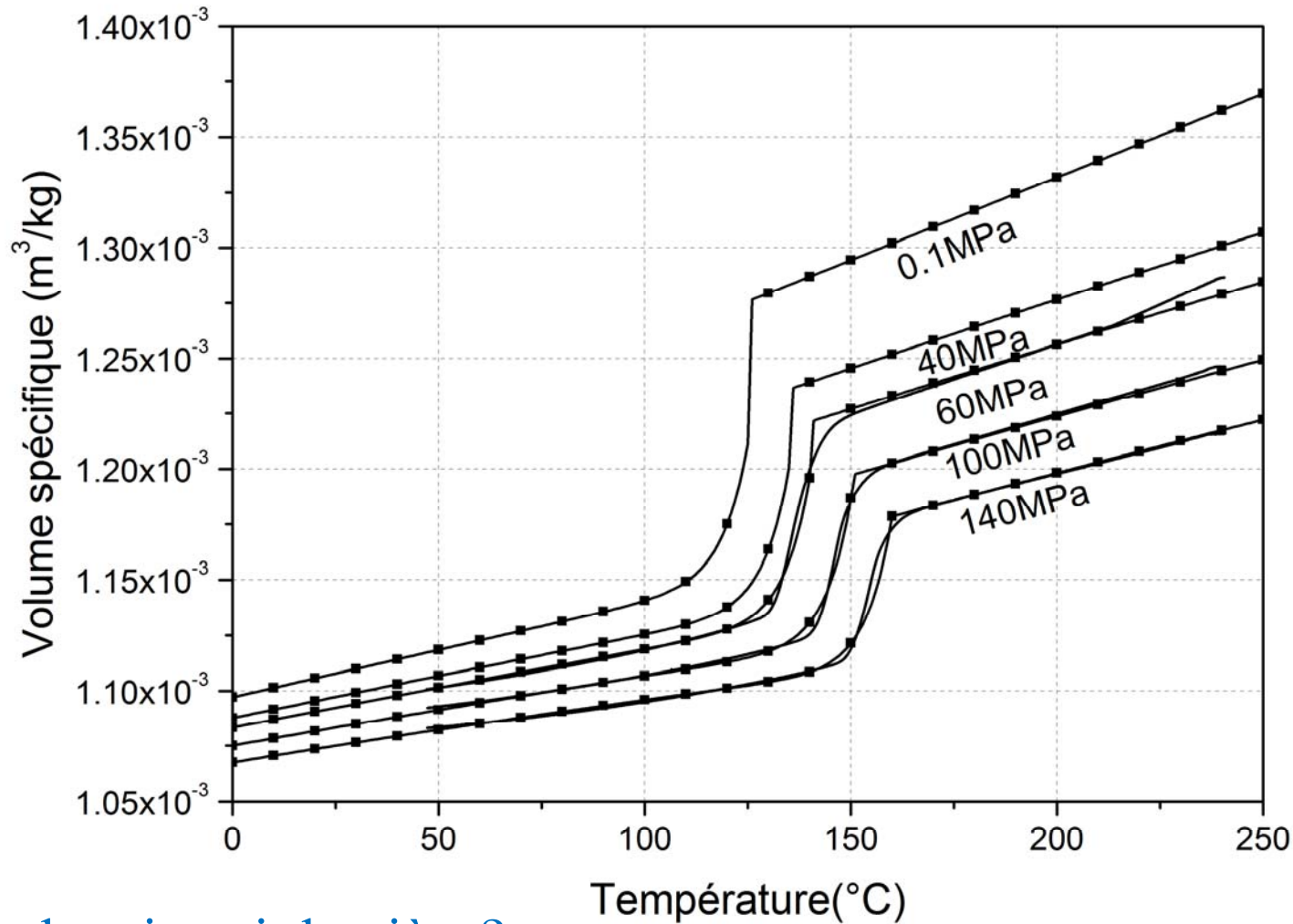
Evolution de la pression pendant un cycle



2 capteurs de flux en vis-à-vis
Capteur de pression

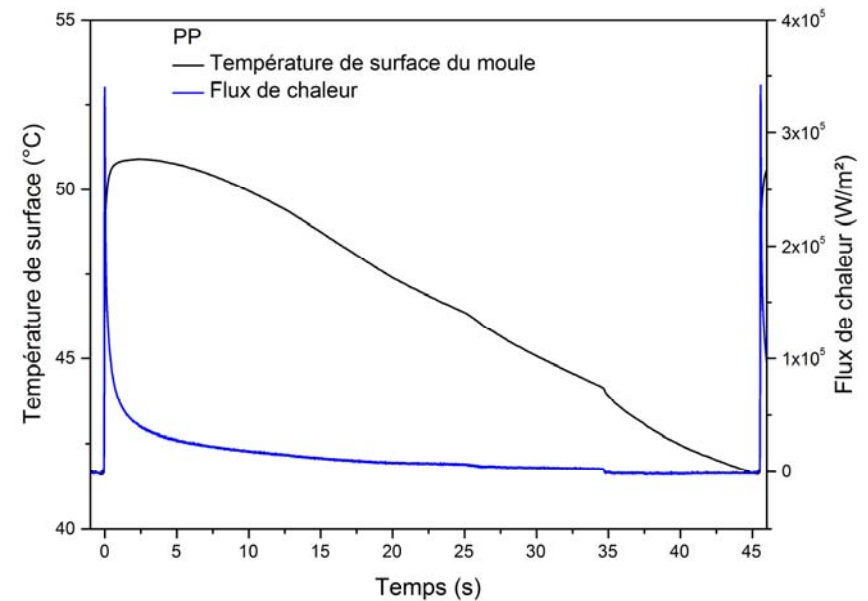
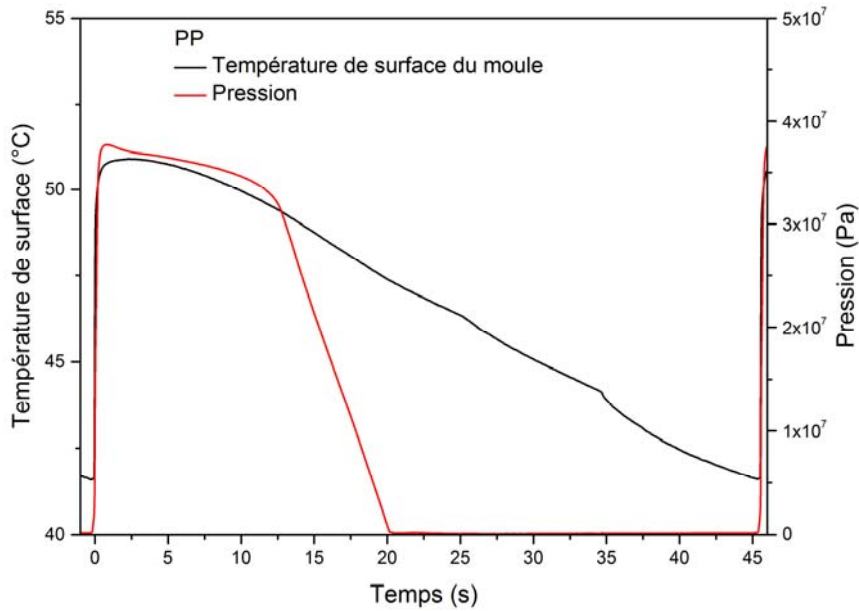
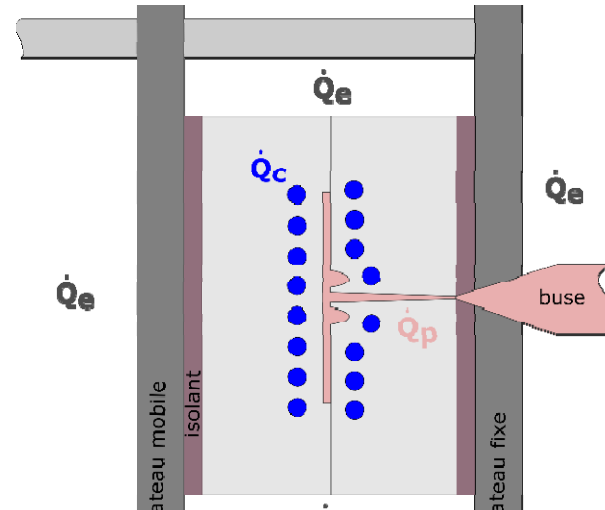
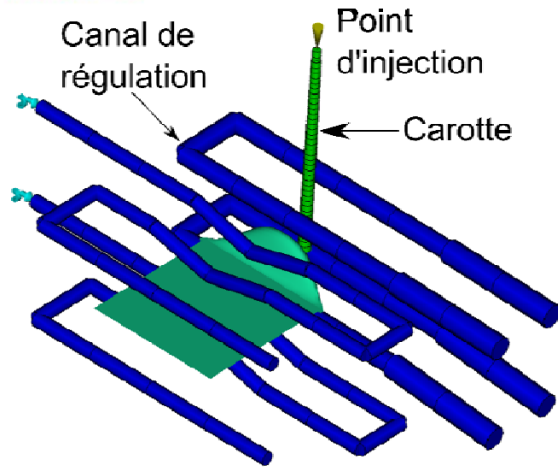


Explication phénomènes?



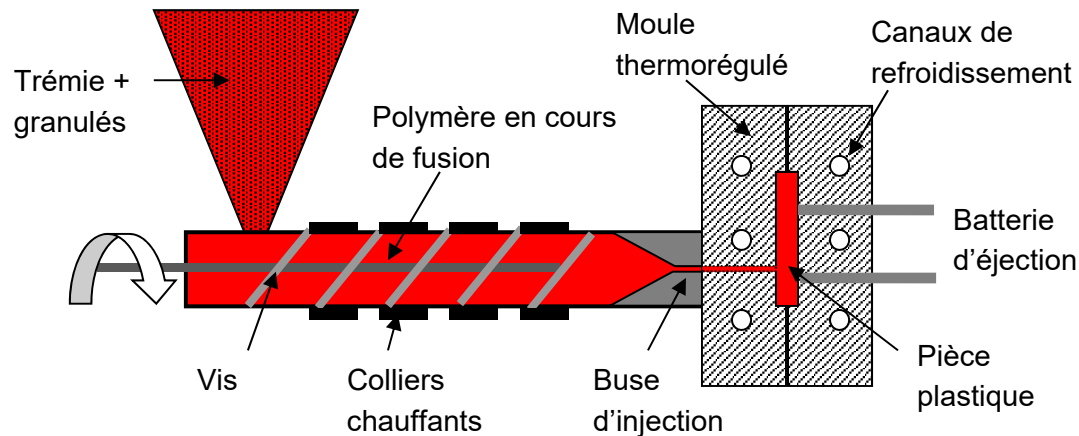
Quel chemin suit la pièce?

Analyse expérimentale des transferts de chaleur pendant un cycle



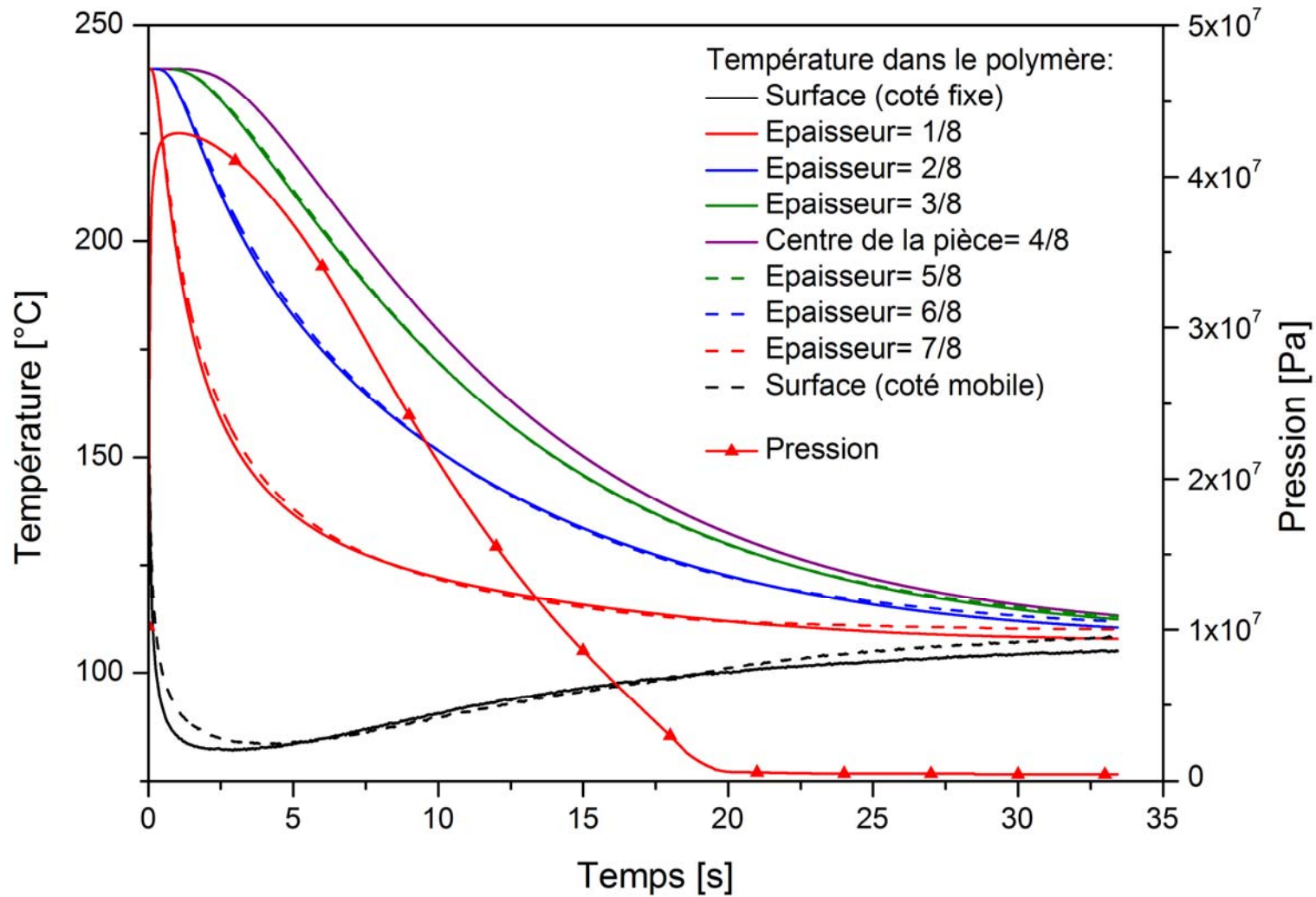
III. Modélisation des transferts dans le polymère pendant un cycle

Pour modéliser le comportement du polymère dans le moule pendant un cycle quels couplages physiques doit-on décrire?

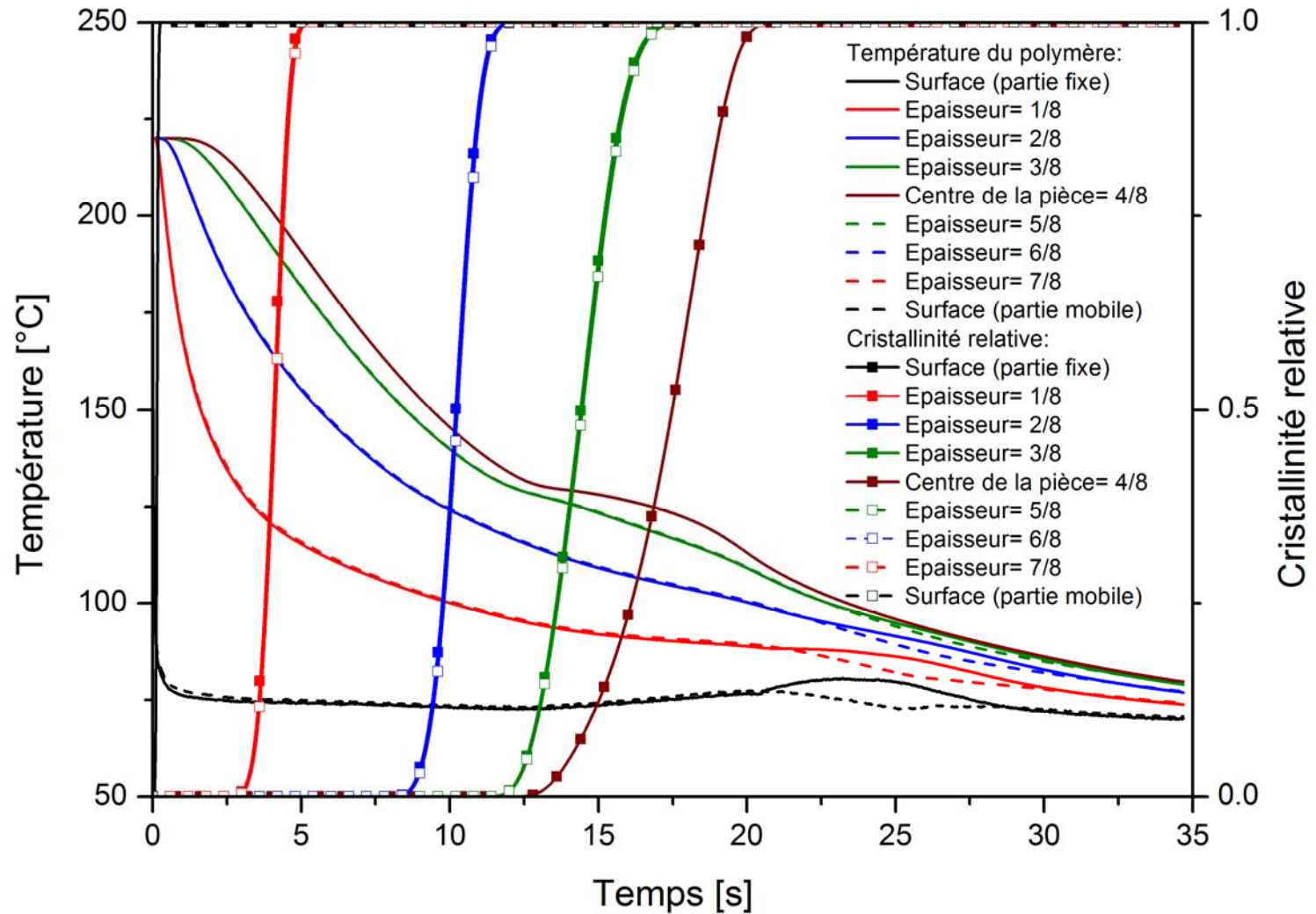


Equation de l'énergie:

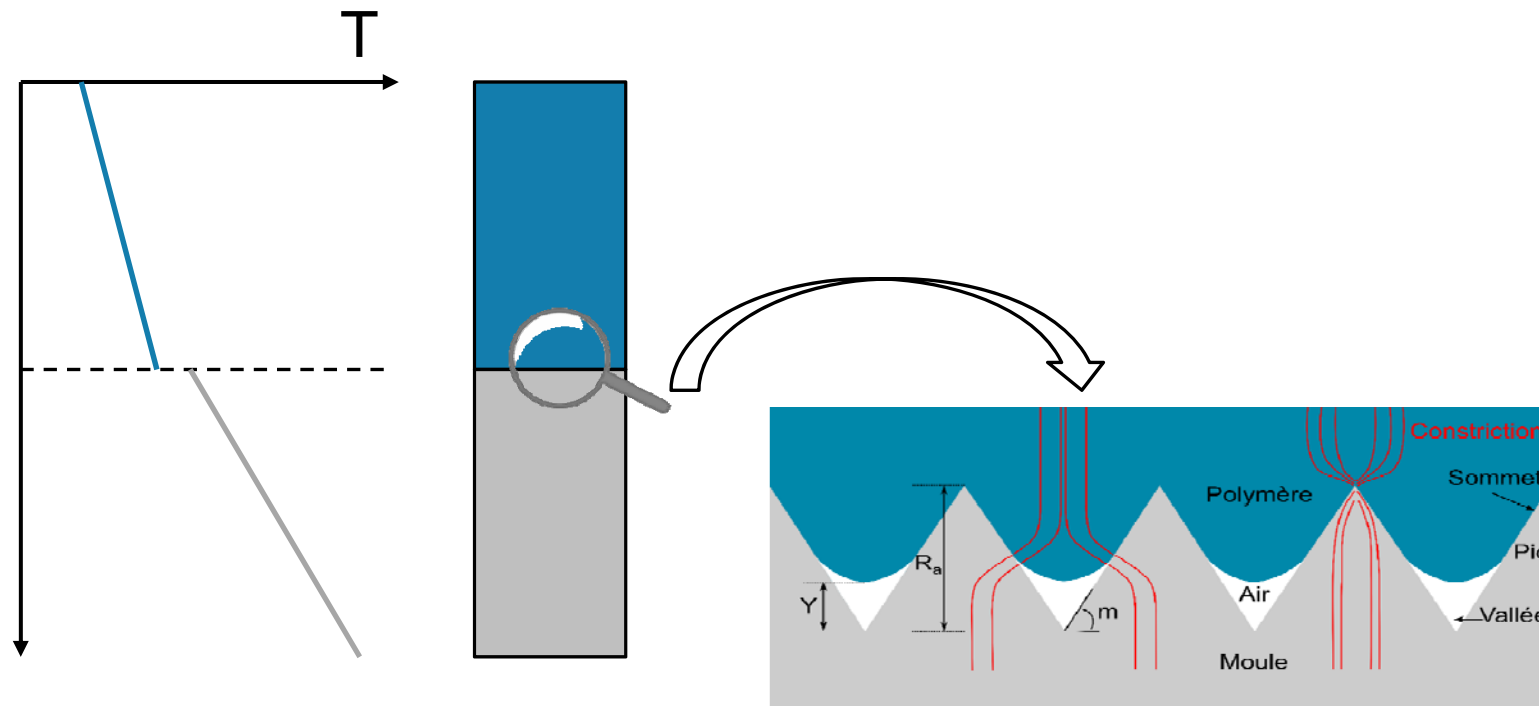
$$\underbrace{(\rho C_p) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T \right)}_{T_1} = \underbrace{\beta T \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} P \right)}_{T_2} + \underbrace{\nabla \cdot [\lambda \vec{\nabla} T]}_{T_3} + \underbrace{\eta \dot{\gamma}^2}_{T_4} + \underbrace{\rho \Delta H \left(\frac{\partial x}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} x \right)}_{T_5}$$

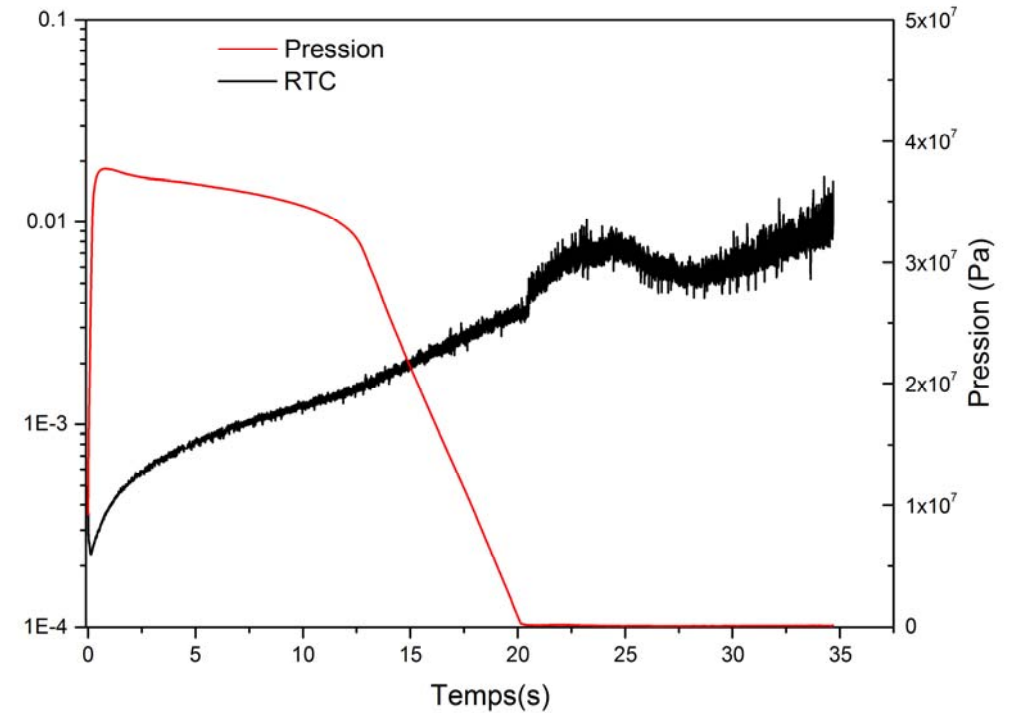
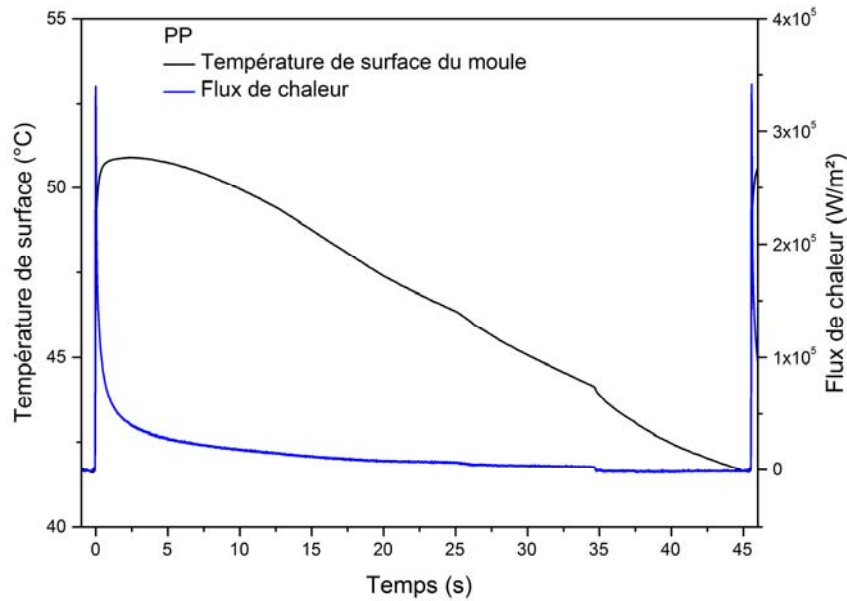


Evolution de la température pour un polymère semi-cristallin



Modélisation du contact imparfait



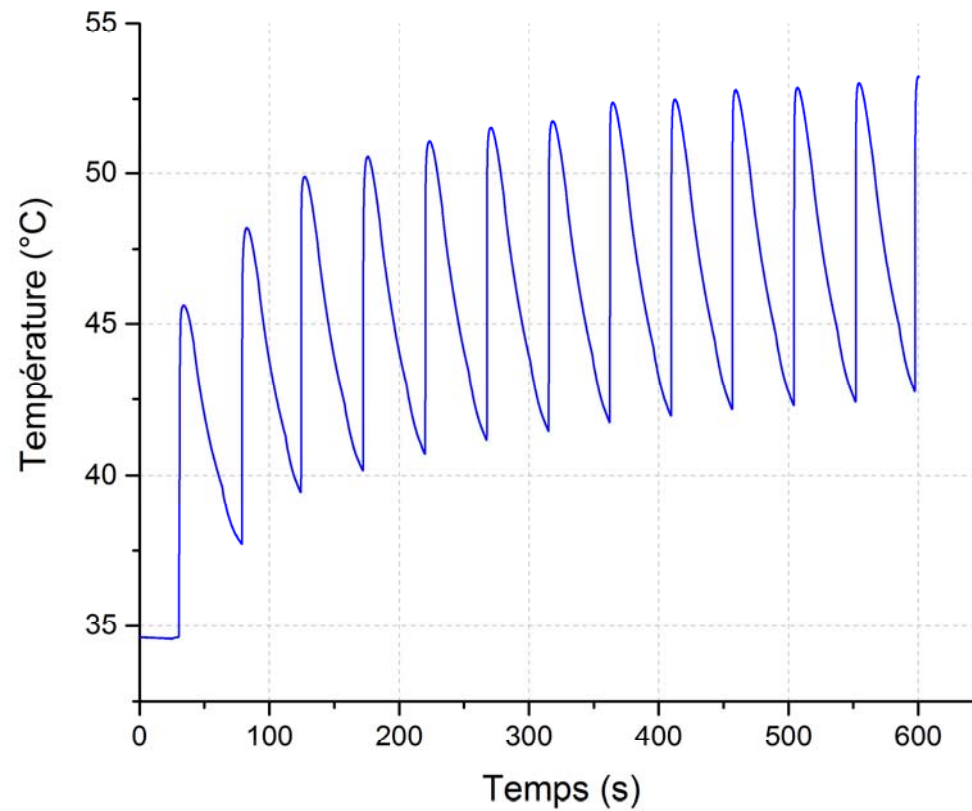


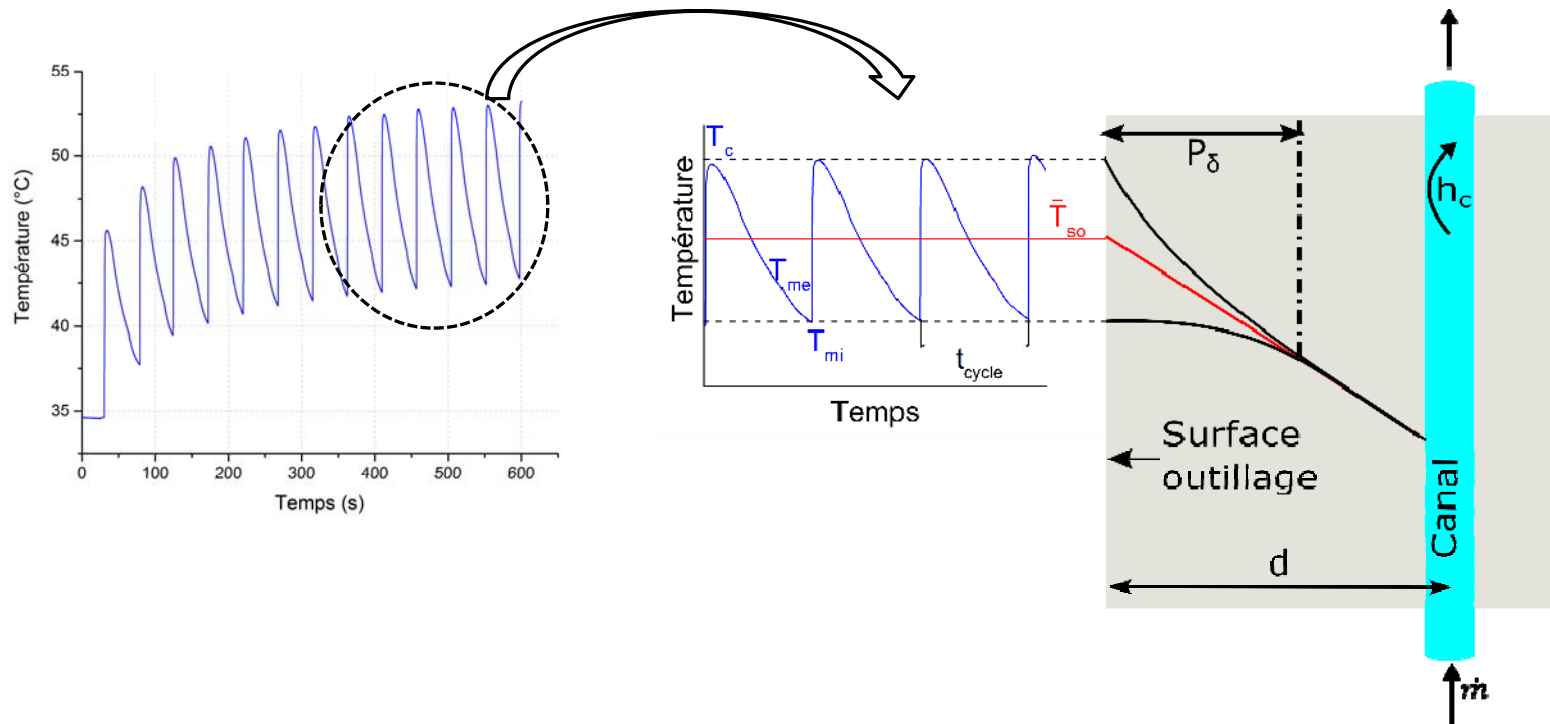
$$\varphi(t) = \frac{T_{\text{spol}}(t) - T_{\text{so}}(t)}{\text{RTC}(t)}$$

IV. Approche analytique des transferts de chaleur: injection des polymères amorphes

- Aspect cyclique dans l'outillage
- Calcul du temps de refroidissement:
 - Pour un polymère amorphe
 - Pour un polymère $\frac{1}{2}$ cristallin
- Avec et sans RTC
- Transferts thermiques dans l'outillage
- Règle de positionnement des canaux

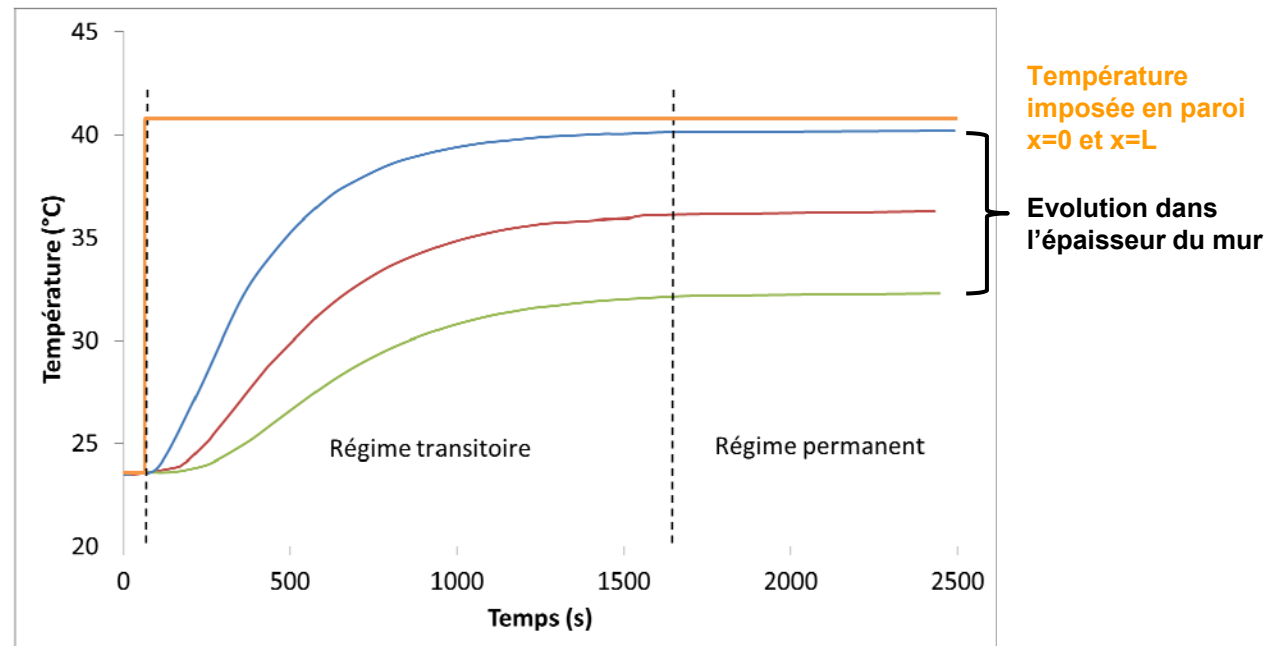
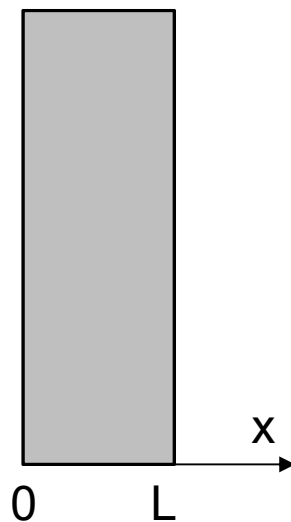
Température de surface du moule





Déterminer le flux moyen échangé dans l'outillage pendant 1 cycle

Evolution de la température dans un mur (1D) soumis à une perturbation:



Formuler le problème de conduction

- A partir de l'hypothèse de séparation des variables, on montre que le champ de température peut s'écrire sous la forme :

$$T(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x) e^{-\frac{t}{\tau_n}} \quad \text{avec} \quad \tau_n = \frac{(L/2)^2}{a_p u_n^2}$$

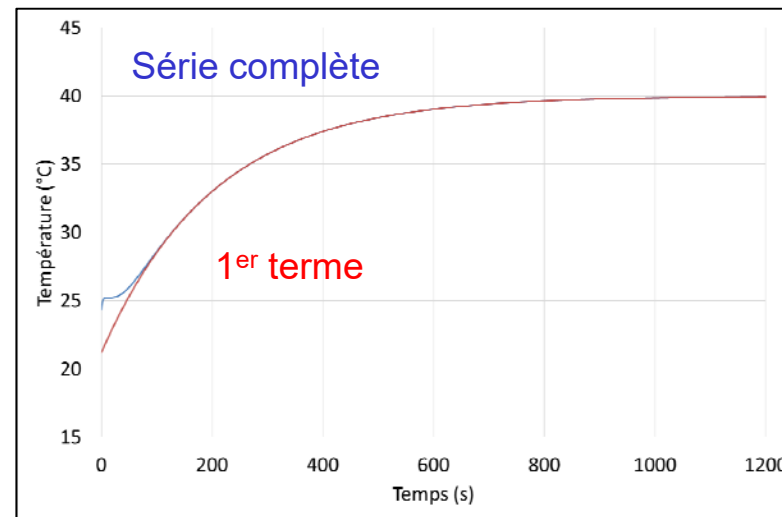
- Simplification en ne considérant que le 1^{er} terme de la série :

$$T(x, t) = f_1(x) e^{-\frac{t}{\tau_1}}$$

avec $\tau_1 = \frac{(L/2)^2}{a_p u_1^2}$

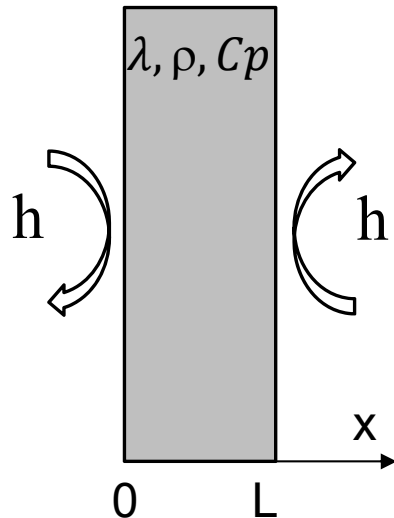
Hypothèse acceptable pour :

$$t^* = \frac{4a_p}{L^2} > 0.15$$



Constante de temps du système $\tau_1 = \frac{(L/2)^2}{a_p u_1}$

u_1 : solution d'une équation transcendante qui dépend des conditions aux limites



Nombre de Biot : $Bi = \frac{hL}{2\lambda}$

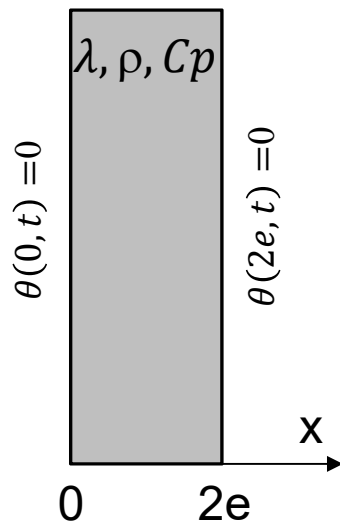
- **$Bi \gg 1$** : u_1 1^{ère} racine de : $\tan u + \frac{2}{Bi} u = 0$

Cas particulier: **$Bi \rightarrow \infty$** alors $u_1 = \pi/2$

- **$Bi \ll 1$** : u_1 1^{ère} racine de : $u \cdot \tan u = 2Bi$

Cas particulier: **$Bi < 0.1$** alors $\tau = \frac{\rho C_p L}{2h}$

Pour un mur d'épaisseur $2e$ et température imposée, le champ de température est donné par :



$$\theta(x, t) = \frac{4\theta_0}{\pi} \sum_{n=1, n \text{ impair}}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi x}{2e} e^{-\frac{t}{\tau_n}}$$

θ_0 : Température initiale

$$\theta(0, t) = \theta(2e, t) = 0$$

Application au cas du refroidissement d'une pièce en thermoplastique en contact parfait:

- Calcul de la température à cœur à l'éjection $T_{\text{éjection}}$ pour le temps de cycle expérimental
- Idem pour la température moyenne

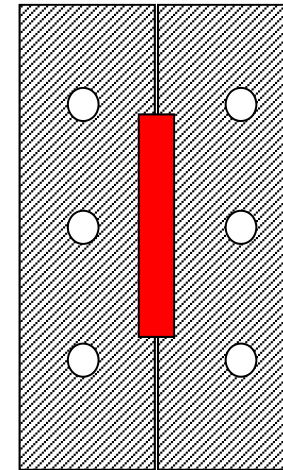
Pour une pièce d'épaisseur $2e$, en polymère amorphe et contact parfait, le temps de refroidissement est donné par :

- Température au centre de la pièce

$$t_{\text{refr}} = \frac{4 \cdot e^2}{a_p \pi^2} \ln \left(\frac{4 T_{\text{inj}} - \overline{T_{\text{so}}}}{\pi T_{\text{ejec}} - \overline{T_{\text{so}}}} \right)$$

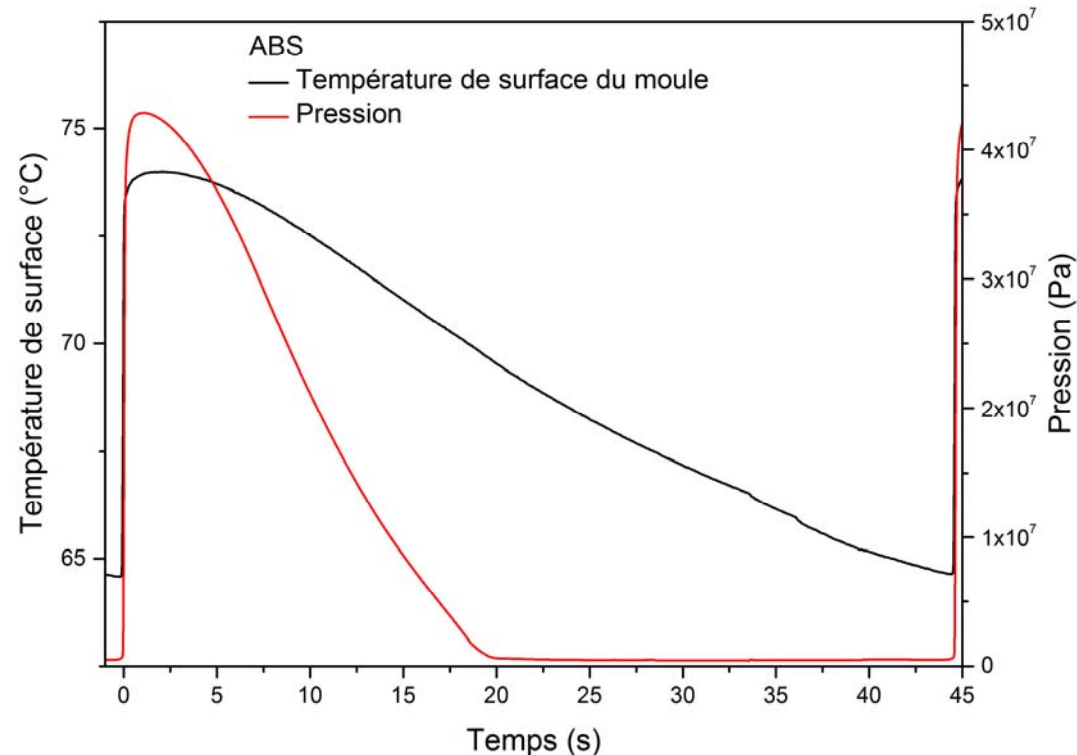
- Température moyenne sur la pièce

$$t_{\text{refr}} = \frac{4 \cdot e^2}{a_p \pi^2} \ln \left(\frac{8 T_{\text{inj}} - \overline{T_{\text{so}}}}{\pi^2 T_{\text{ejec}} - \overline{T_{\text{so}}}} \right)$$



Application pour le cas de l'ABS:

- 1^{er} cas: on a la courbe de température de surface de l'outillage

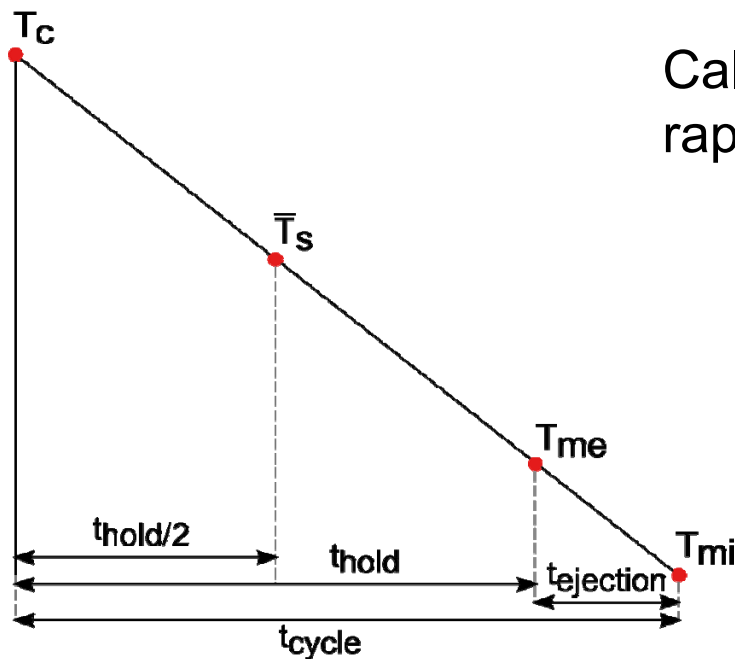


Calcul de la constante de temps de la pièce polymère

Calcul de la température du polymère à l'éjection

Application pour l'abs:

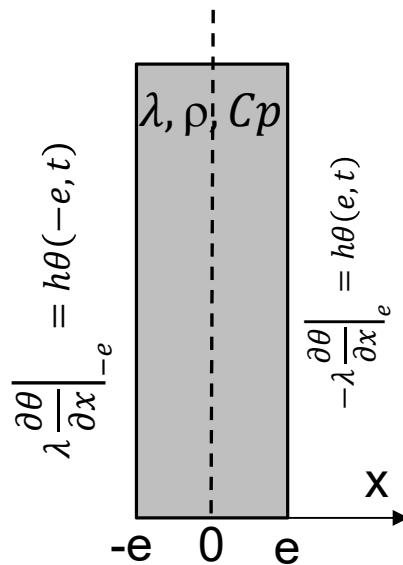
- 2^{ème} cas: on ne connaît la température qu'avant l'injection (caméra thermique par exemple).



Calcul de la température de contact avec le rapport des effusivités .

$$T_c = \frac{T_{inj}b_p + T_{mi}b_m}{b_p + b_m}$$

Pour un mur d'épaisseur $2e$ et température imposée, le champ de température est donné par :



$$\theta(x, t) = \theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \sin(u_n)}{2u_n + \sin(2u_n)} \cos\left(\frac{u_n x}{e}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)$$

θ_0 : Température initiale

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{-e} = h \theta(-e, t) \quad -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_e = h \theta(e, t)$$

Application au cas du refroidissement d'une pièce en thermoplastique en contact **imparfait**:

- Calcul du temps de refroidissement pour que la température à cœur soit égale à $T_{\text{éjection}}$
- Idem pour la température moyenne

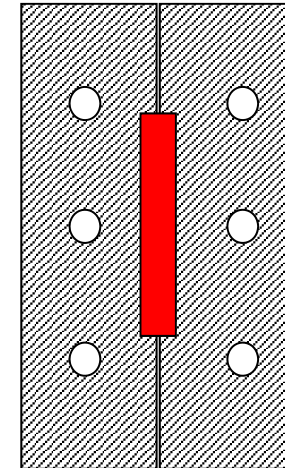
Pour une pièce d'épaisseur $2e$, en polymère amorphe et contact imparfait, le temps de refroidissement est donné par :

- Température au centre de la pièce

$$t_{\text{refr}_{Bi}} = \frac{e^2}{a_p u_1^2} \ln \left[\frac{4 \sin(u_1)}{2u_1 + \sin(2u_1)} \frac{T_{\text{inj}} - T_{\infty}}{T_{\text{ejec}} - T_{\infty}} \right]$$

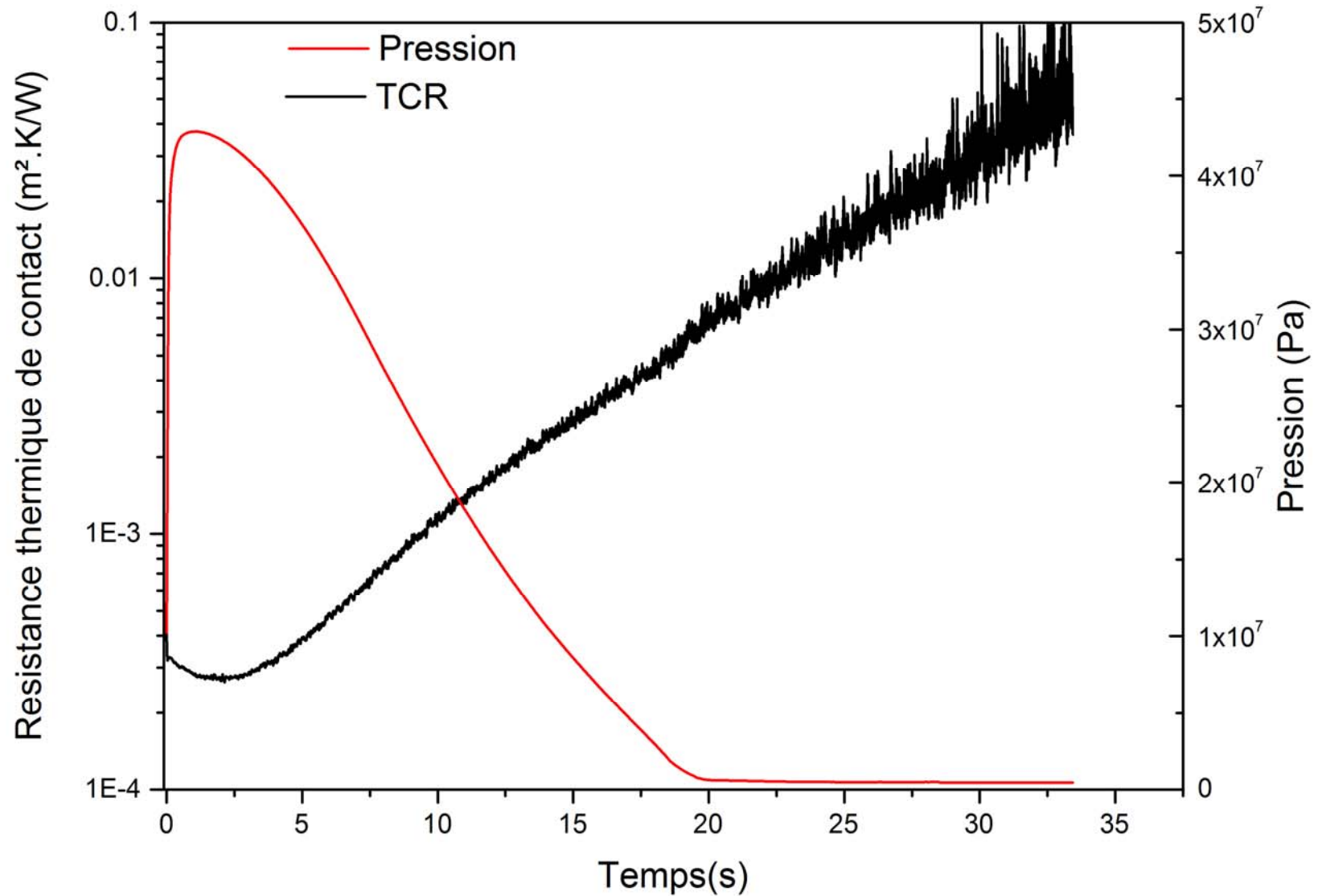
- Température moyenne sur la pièce

$$t_{\text{refr}_{Bi}} = \frac{e^2}{a_p u_1^2} \ln \left[\frac{4 \sin^2(u_1)}{u_1 (2u_1 + \sin(2u_1))} \frac{T_{\text{inj}} - T_{\infty}}{\bar{T}_{\text{ejec}} - T_{\infty}} \right]$$

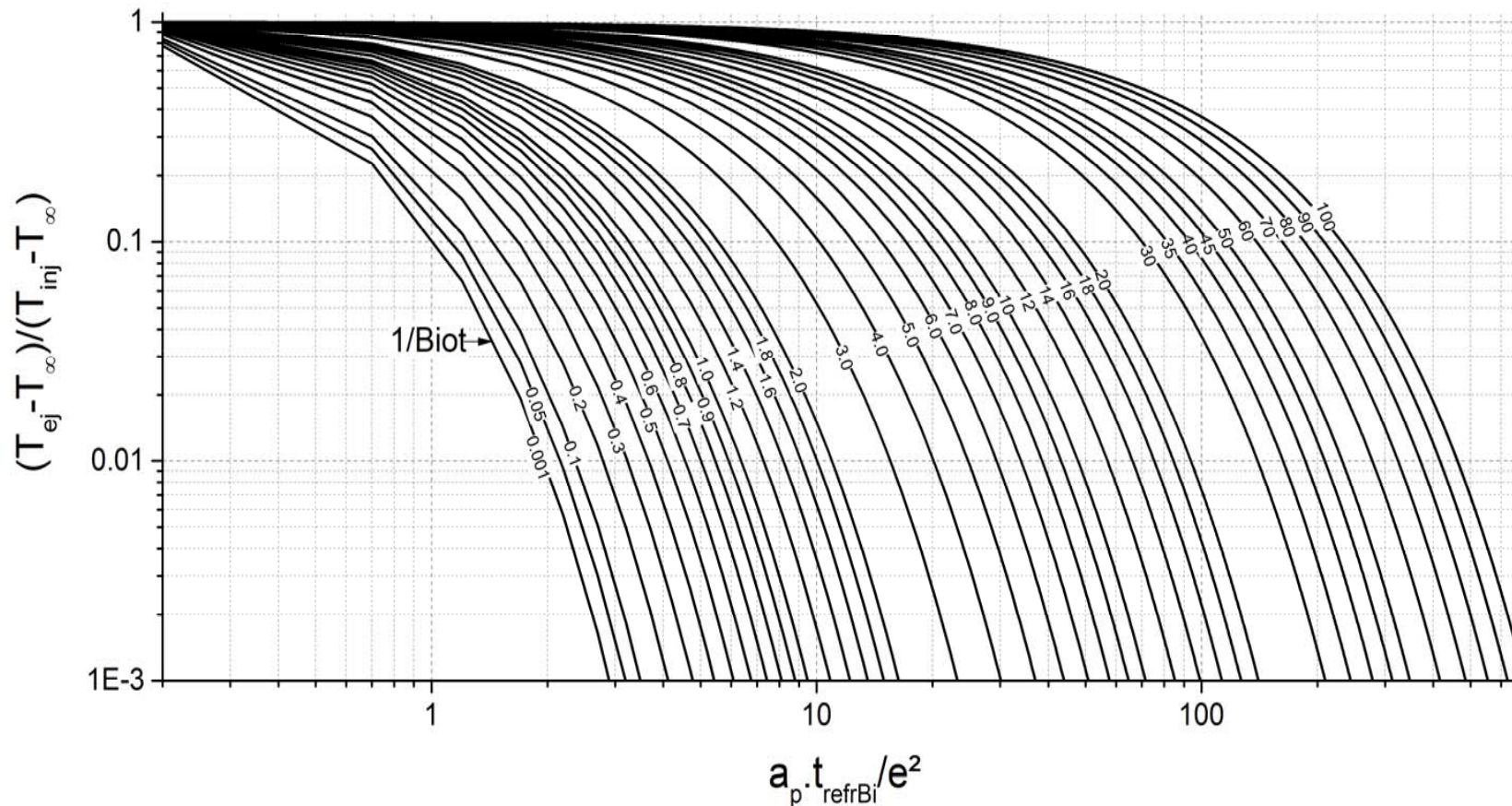


$$u \tan(u) = Bi = \frac{e}{R_G \lambda_p}$$

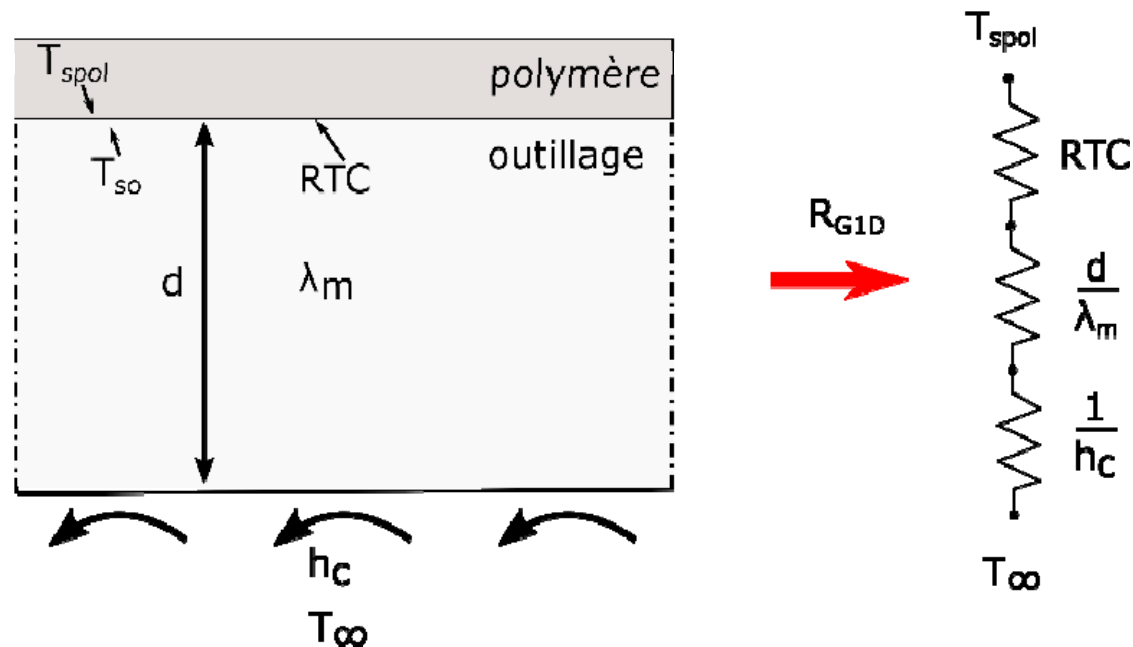
Bi	u_1	Bi	u_1	Bi	u_1
0	0	1	0,86031	10	1,42887
0,05	0,22175	2	1,07687	20	1,49612
0,1	0,31106	3	1,19244	50	1,54001
0,2	0,43281	4	1,26456	100	1,55525
0,5	0,65325	5	1,31381	300	1,56558
0,7	0,75056	7	1,37662	∞	$\pi/2$



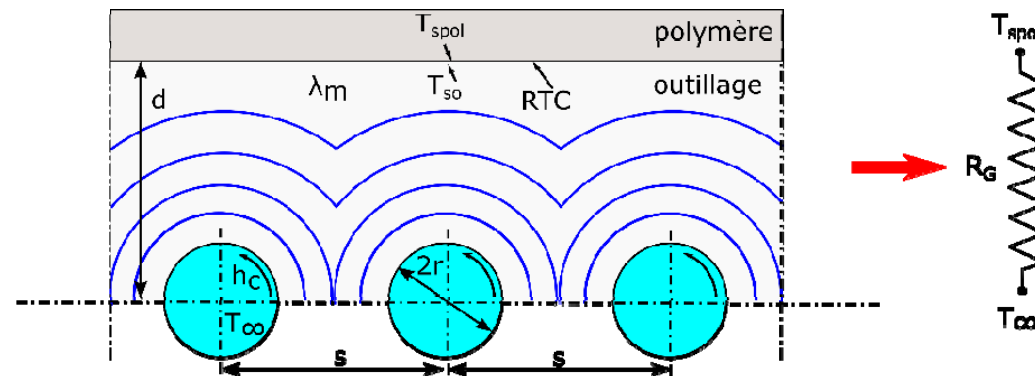
Abaque pour déterminer le temps de refroidissement



Généralisation: même modèle, mais prise en compte de la résistance thermique globale



Prise en compte de la constriction induite par les canaux



$$R_G = \frac{s}{2\pi} \left\{ \frac{1}{h_c r} + \frac{1}{\lambda_m} \ln \left[\frac{s}{\pi r} \sinh \left(2\pi \frac{d + \lambda_m \cdot RTC}{s} \right) \right] \right\}$$

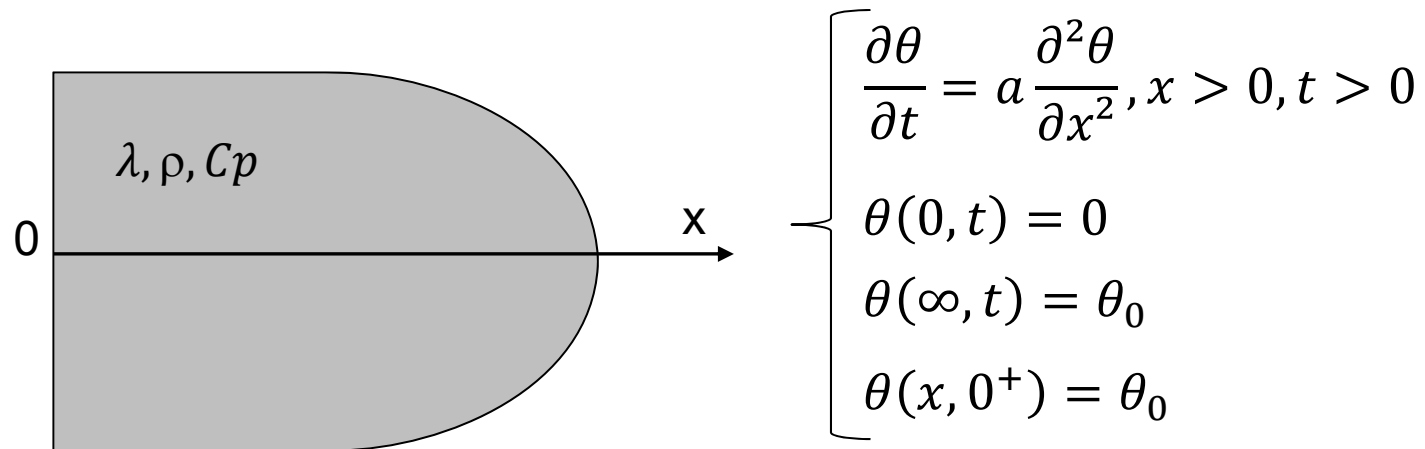
Calcul de la température moyenne de surface de l'outillage

$$\frac{\bar{T}_{\text{ejec}} - \bar{T}_{\text{so}}}{\bar{T}_{\text{inj}} - \bar{T}_{\text{so}}} = \frac{4 \sin^2(u_1)}{u_1 (2u_1 + \sin(2u_1))} \exp\left(-\frac{a_p u_1^2 t_{\text{refr}_{\text{Bi}}}}{e^2}\right)$$

Hypothèse du milieu semi-infini: intéressante pour étudier le début des phénomènes transitoires

↳ Perturbation limitée dans l'espace

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$



Le champ de température est donné par:

$$\theta(x, t) = \theta_0 \cdot \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) \quad x > 0, t > 0$$

Avec hypothèse du milieu semi-infini:

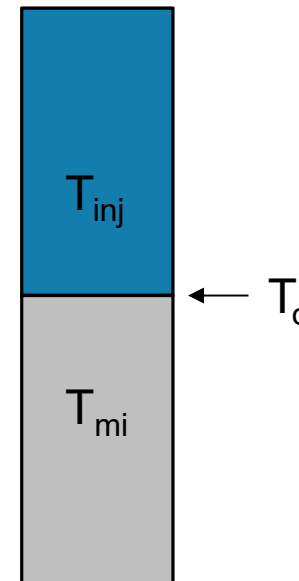
- Calcul du flux évacué par le polymère en fonction du temps:

$$\varphi_{\text{msi}}(t) = ?$$

- Calcul du flux moyen évacué par le polymère et comparaison avec le modèle capacitif

$$\bar{\varphi} = \frac{\rho_p c_{p_p} e (T_{\text{inj}} - \bar{T}_{\text{ejection}})}{t_{\text{cooling}}}$$

Calcul de la température de contact (T_c) entre le polymère et le moule au moment de l'injection



Comparaison entre le flux obtenu avec le modèle semi-infini et la mesure

