



# Matériaux composites : phénomènes couplés contrôlant l'élaboration. Relations avec les pptés.

Philippe OLIVIER,

Institut Clément Ader (UPS, INSA, Ecole des Mines d'Albi, ISAE)



Groupe Matériaux & Structures Composites, Axe Matériaux Procédés Propriétés

[philippe.olivier@iut-tlse3.fr](mailto:philippe.olivier@iut-tlse3.fr)



**i**

## Introduction : généralités sur les procédés

### i.1 Association fibres / matrice

**Renfort**

**Matrice**

particules  
micro-billes  
fibres courtes  
  
fibres longues

mat  
  
roving (bobine)  
nappe unidirectionnelle  
tissus

Thermoplastique  
Thermodurcissable  
mélange des 2

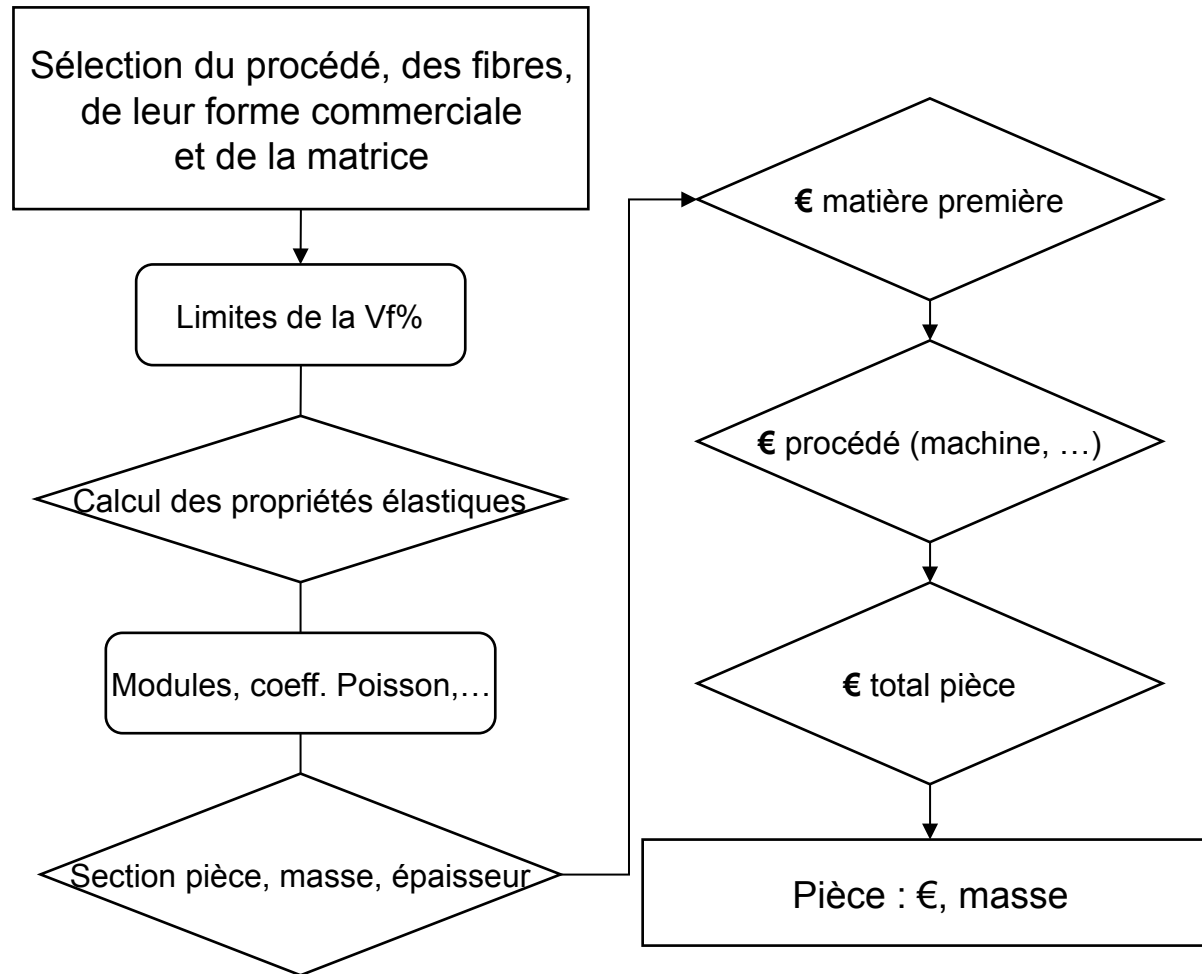
**Procédés de mise en œuvre**

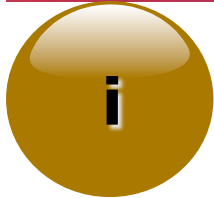
- |  |  |  |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Moulage au contact</li> <li>- Drapage manuel, autoclave, presse-clave, étuve</li> <li>- Enroulement filamentaire</li> <li>- SCRIMP</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compression (SMC, BMC)</li> <li>- Compression transfert</li> <li>- Injection basse pression (RTM)</li> <li>- Infusion de résine liquide</li> <li>- Reactive Injection Moulding (RIM)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pultrusion</li> <li>- Injection TP</li> <li>- Stratification en continu</li> <li>- Centrifugation</li> <li>- Placement de fibres</li> </ul> |
|--|--|--|




i


## i.2 Procédés / pièces industrielles

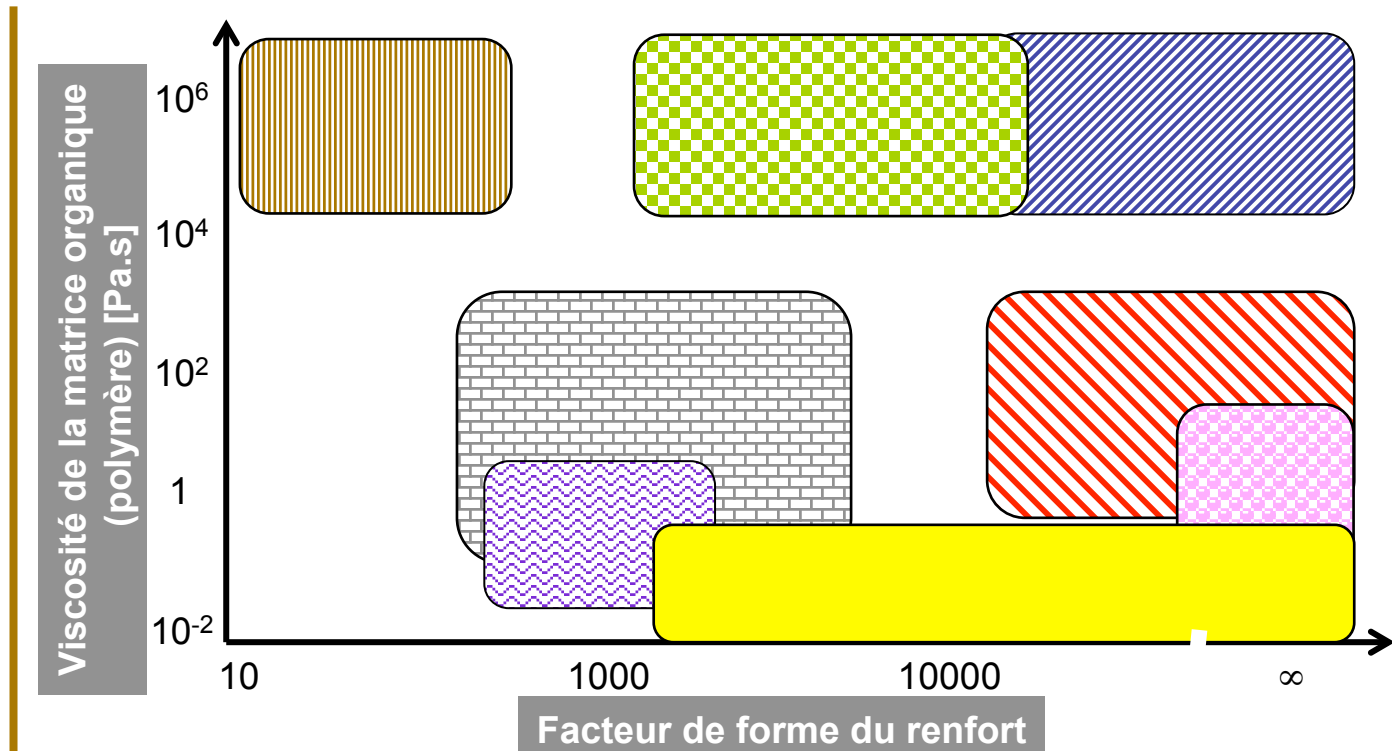






## i.3 Faisabilité : Procédés / Viscosité des matrices / Facteur de forme du renfort


 Mats ou tissus secs,  
nappes UD sèches  
**RTM, Infusion, RFI**


 Prepreg tissés ou  
UD à matrice  
Thermodurcissable  
**PRESSE-CLAVE**  
ou **AUTOCLAVE**  
Placement autom.





 **INJECTION** de thermoplastiques  
fibres courtes (< 2 mm)

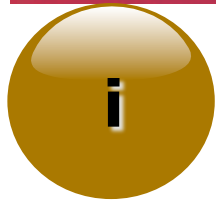
 Fibres courtes distributions aléatoires  
**BMC SMC** Moulage par compression (poinçon / Matrice)

 Mèches de fils secs ou préimprégnés  
**ENROULEMENT FILAMENTAIRE**

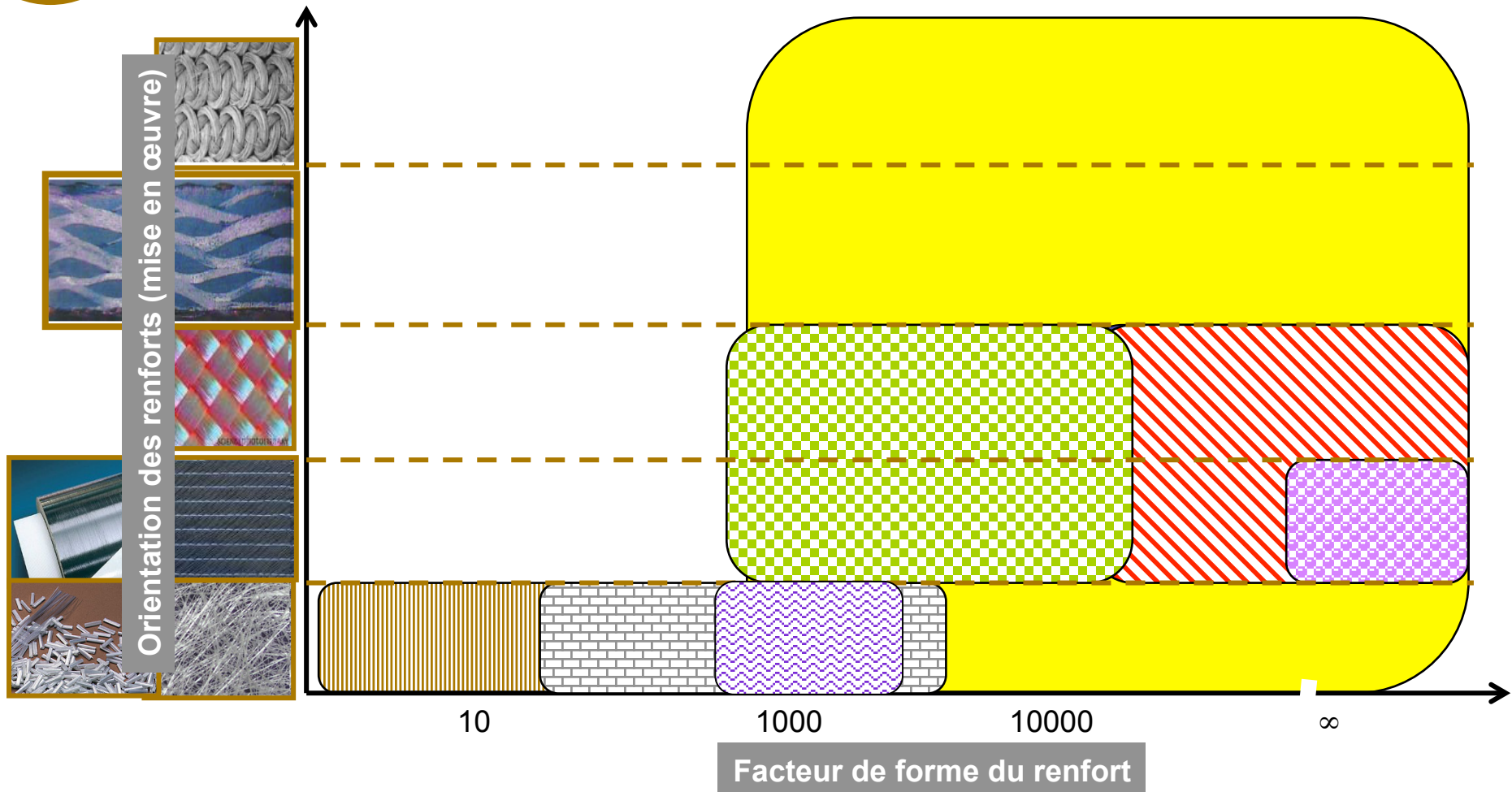
 Feuilles à mouler thermoplastique fibres courtes  
**Presse poinçon/matrice**

 Composites matrice thermoplastique +  
fibres longues UD Préimprégnés  
**PRESSE ou AUTOCLAVE**

 Fibres courtes (mats)  
**Moulage au contact/projection simultanée**



## i.3 Faisabilité : Procédés / Orientation des renforts / Facteur de forme du renfort





**i**

## i.4 Procédés / Utilisation industrielle / Économie

Procédés	France	Europe	Japon	Etats Unis	Brésil	Monde
Compression SMC/BMC	105	280	136	340	3	930
Injection TPR	75	740	680	850	76	2 503
Moulage contact & projection	54	360	578	1 530	73	1 645
Enroulement filamentaire	6	200	119	0	0	358
Pultrusion	6	40	17	340	2	787
Imprégnation continu	12	60	102	68	7	288
RTM	15	60	17	102	5	215
Drapage	9	180	17	34	2	143
RIM	9	20	17	34	0	72
Estampage TRE	9	60	17	102	2	215
<b>Total</b>	<b>300</b>	<b>2 000</b>	<b>1 700</b>	<b>3 400</b>	<b>169</b>	<b>7 150</b>

(Extrait du document « L'industrie Française des Composites » Ministère Industrie **2001** - Valeurs en milliers de tonnes ; Étude DiGiTiP/SIM réalisée par Nodal Consultants)



i

## i.4 Procédés / Utilisation industrielle / Economie

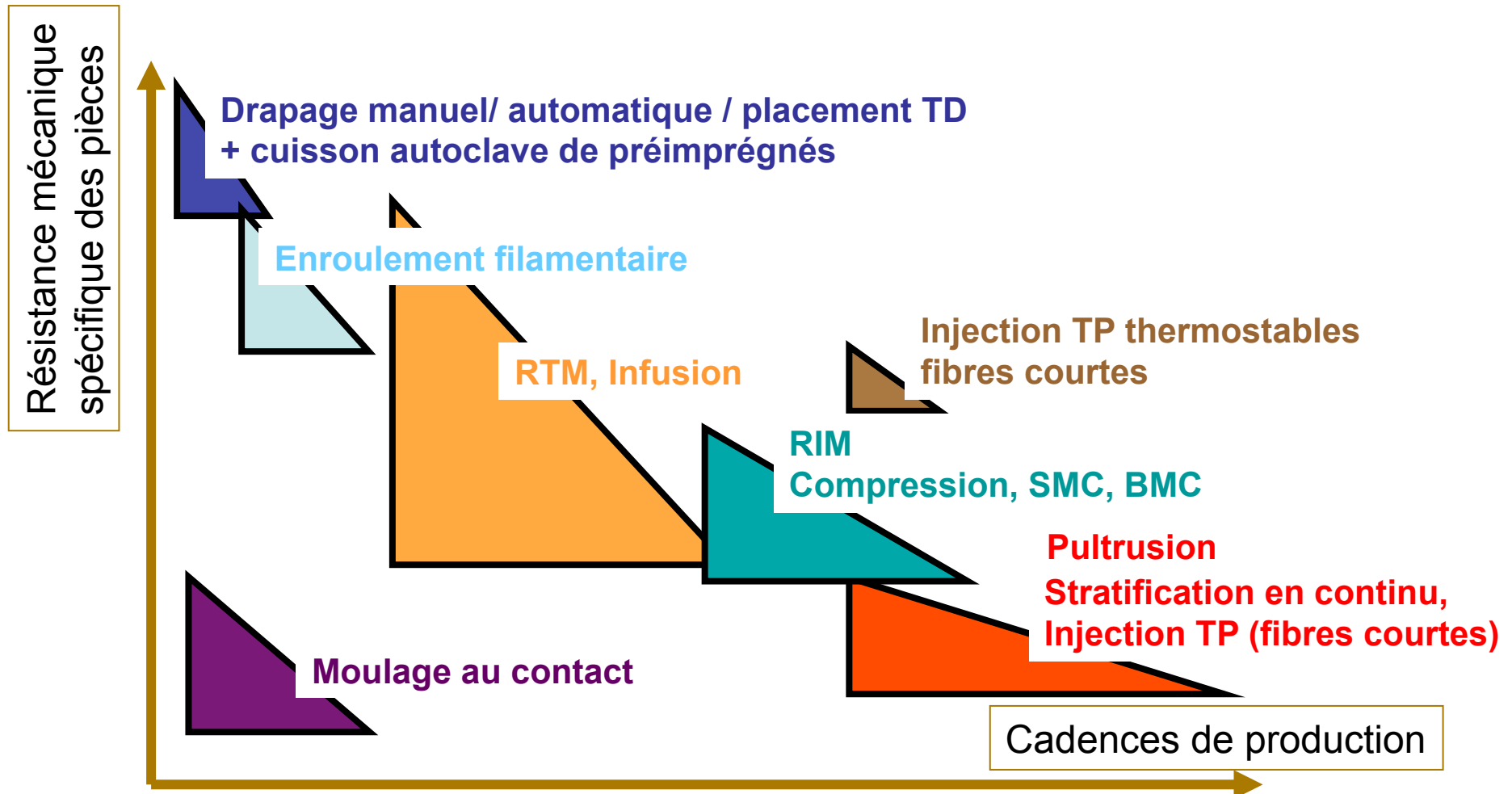
Secteurs d'application	Performances		Economie de procédé		Cadences	
Aéronautique	Très hautes	4	Non prioritaire	1	1-10 pièces/jour	1
Automobile	Moyennes	2	Essentielle	4	Plus 500 pièces/jour	4
Ferroviaire	Hautes	3	Importante	3	10-50 pièces/jour	2
Bâtiment	Moyennes	2	Essentielle	4	50-500 pièces/jour	3
Construction industrielle	Hautes	3	Appréciée	2	10-50 pièces/jour	2
Industrie nautique	Moyennes	2	Appréciée	2	1-10 pièces/jour	1
Médical	Très hautes	4	Non prioritaire	1	50-500 pièces/jour	3
Electricité	Hautes	3	Essentielle	4	Plus 500 pièces/jour	4
Sports et loisirs	Très hautes	4	Importante	3	Plus 500 pièces/jour	4

(Extrait du document « L'industrie Française des Composites » Ministère Industrie **2001** ; Étude DiGiTiP/SIM réalisée par Nodal Consultants)



i

## i.5 Relations procédé de mise en œuvre / résistance / série



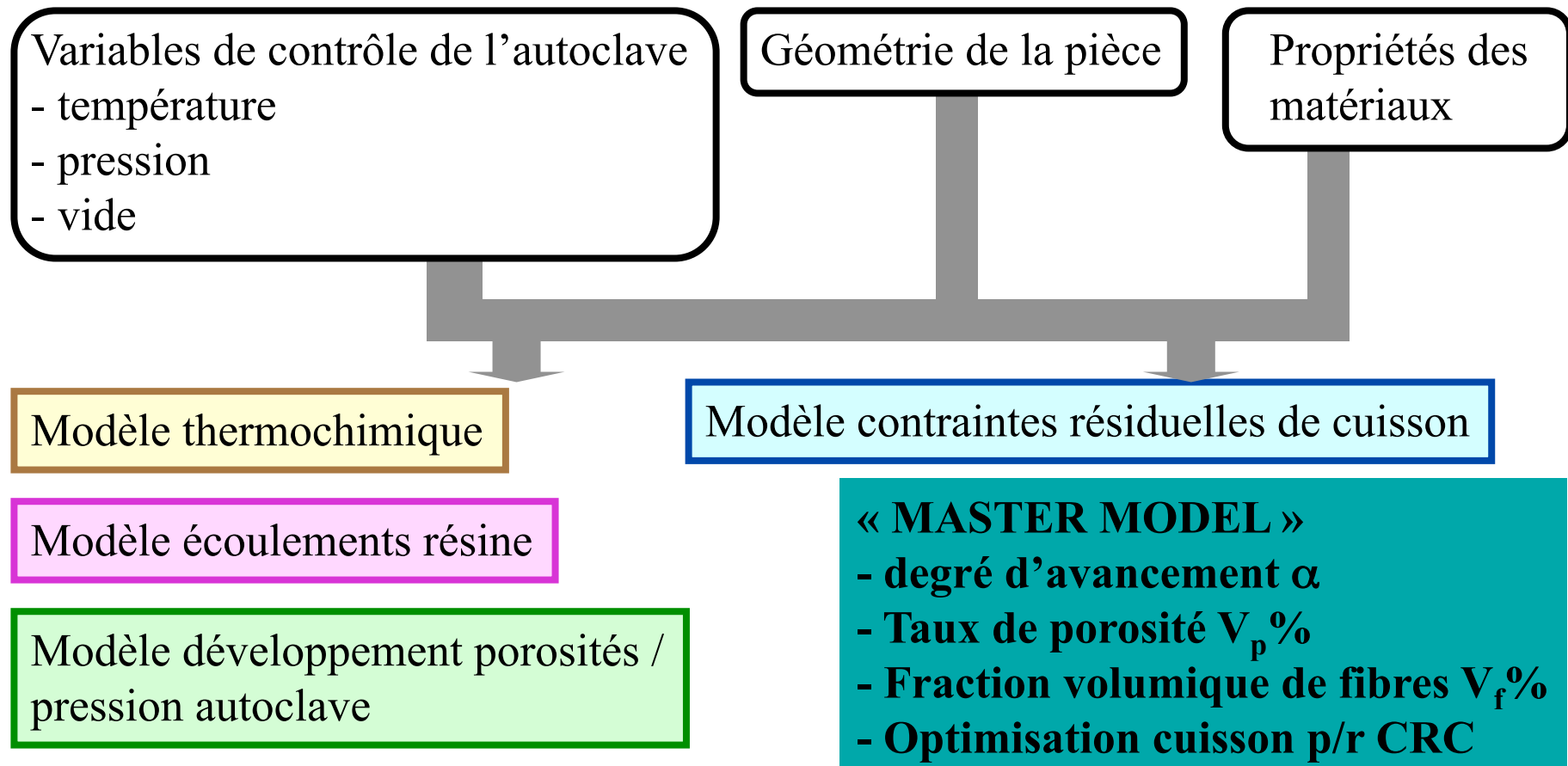




i

## i.6 Quels paramètres procédés de mise en œuvre

Identification globale couplages (cas cuisson autoclave)





**i**

**i.6 Quels paramètres procédés de mise en œuvre**

Lieu des couplages : équation de la chaleur

**Cinétique de réaction**

$$\alpha = f(T, t)$$

et

**Enthalpie totale de réaction**

$$H_{Tot}$$

Modélisation des transferts de chaleur :  
profil des  $T^\circ$  dans la pièce en cours de cuisson

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho^c(\alpha) \cdot C^c(\alpha, T) \cdot T(z, t)] = \frac{\partial}{\partial z^2} [\lambda^c(\alpha, T) \cdot T(z, t)] + \rho^c(\alpha) \cdot H_{Tot} \cdot \frac{d\alpha}{dt}$$

Variation des caractéristiques physiques et thermiques  
du stratifié en cours de cuisson :

**Masse volumique**

$$\rho = f(\alpha, Vf)$$

**Coefficient de conductivité thermique**

$$\lambda = f(\alpha, T, Vf)$$

**Chaleur massique à P cte.**

$$Cp = f(\alpha, Vf)$$

*Source  
interne  
de chaleur*



- Plan de l'exposé

Systemes de  
polymères thermodurcissables

**A**

Eléments sur la cinétique de  
réaction et la rhéologie

**B**

Quelques procédés de  
mise en oeuvre analyses

**C**



Systemes de  
polymères thermodurcissables

**A**



## A Systèmes de polymères thermodurcissables

### A.1 Changements de phases polymères thermodurcissables

*Liquides de faibles  
poids moléculaires*

$\eta$  système époxy pour  
RTM : 0,01 Pa.s



*Polymères  
solides amorphes*

$E > 10^3$  MPa

gélification

vitrification

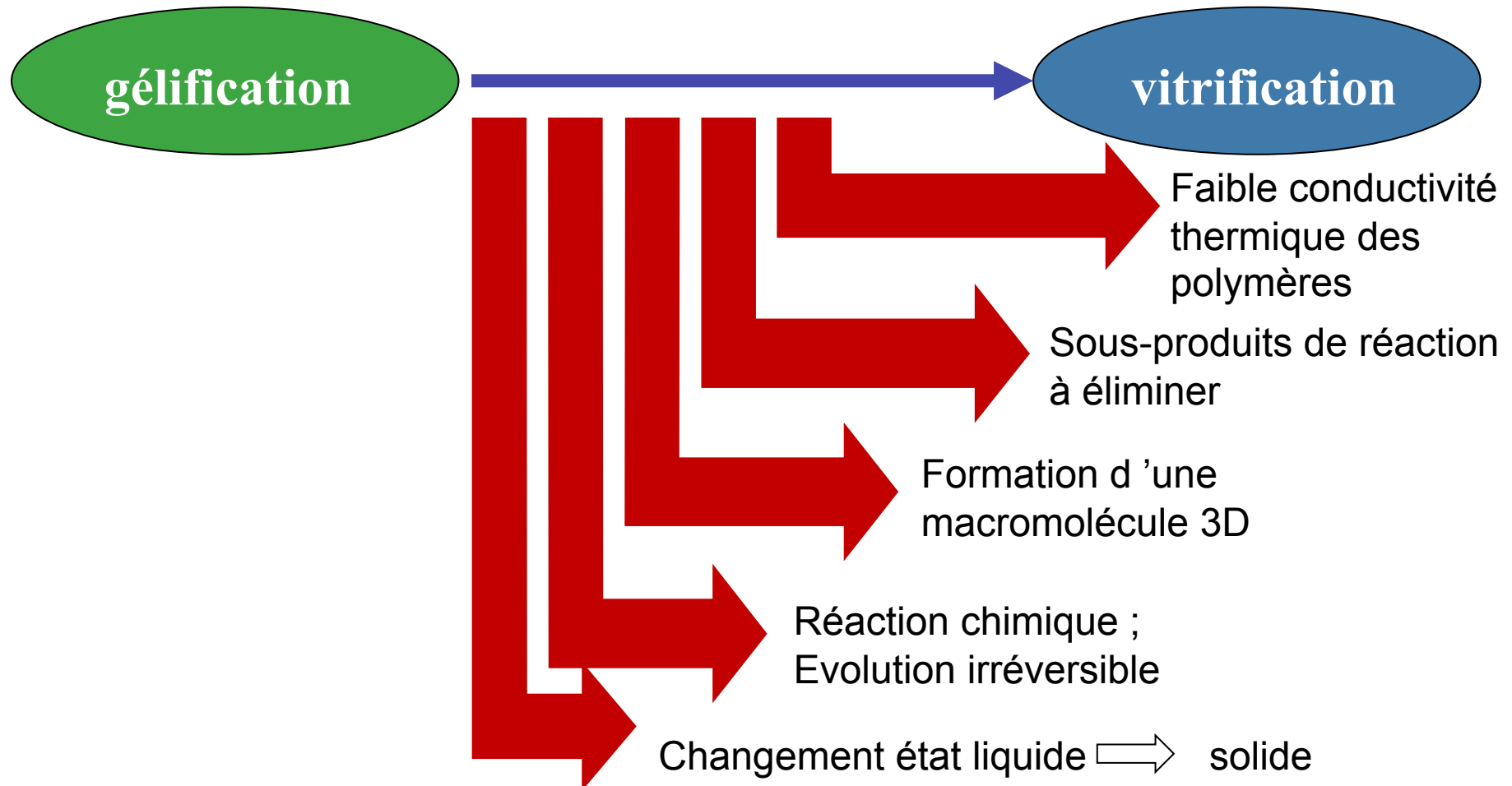
$\eta \nearrow, \bar{M}_c \nearrow, T_g \nearrow, \alpha \nearrow$



**A**

## A.1 Changements de phases polymères thermodurcissables

### A.1.1 Matrices Thermodurcissables : problématique de mise en oeuvre





**A**

## A.1 Changements de phases polymères thermodurcissables

### A.1.2 Matrices Thermodurcissables : liens chimie / mécanique

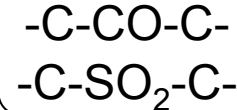
Propriétés mécaniques finales

Groupes composition chimique

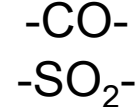
Groupes rigides



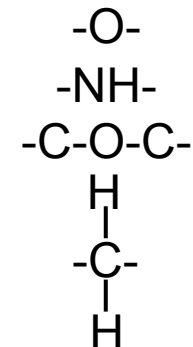
*phénylène aromatique*



Groupes polaires



Groupes flexibles





**A**

**A.1 Changements de phases polymères thermodurcissables**

**A.1.3 Matrices Thermodurcissables : types majeurs de réactions**

**Réaction en chaîne**

Polyesters insaturés (UP)

*Bismaléimide+DDM+DABPA*

*Bismaléimide+Cyanate (typeBT)*

Cyanate

*Bismaléimide*

*Polyimides (PI)*

Epoxydes (EP)

**Polycondensation**

Epoxydes

Phénoliques

*Bismaléimide*

Polyuréthane

*Cyanate+époxy*

*Cyanate+Ester*

*Polyimides*



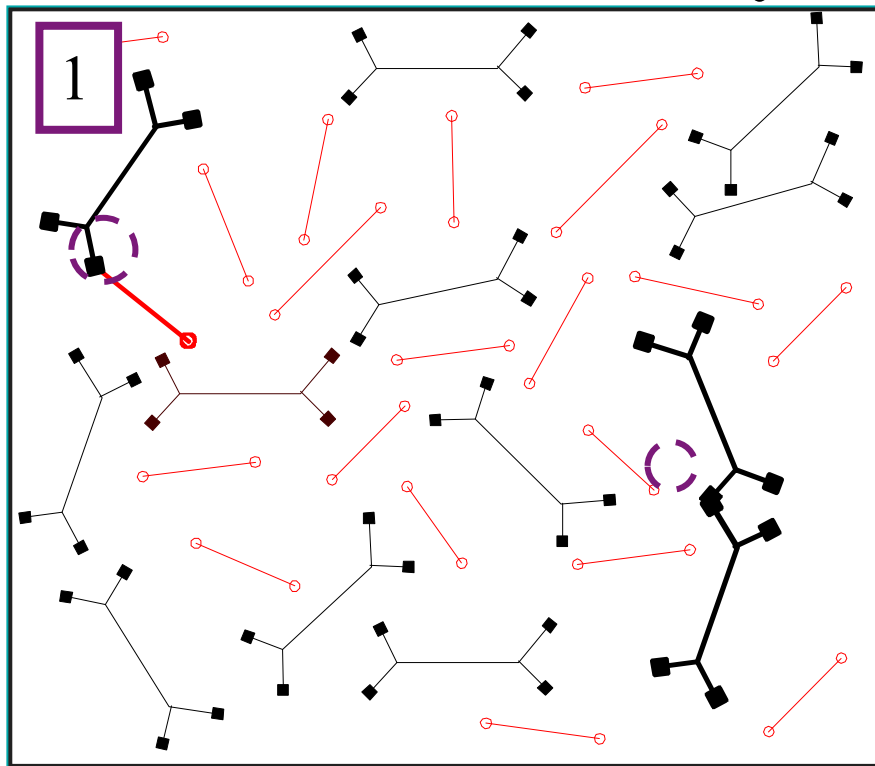


**A**

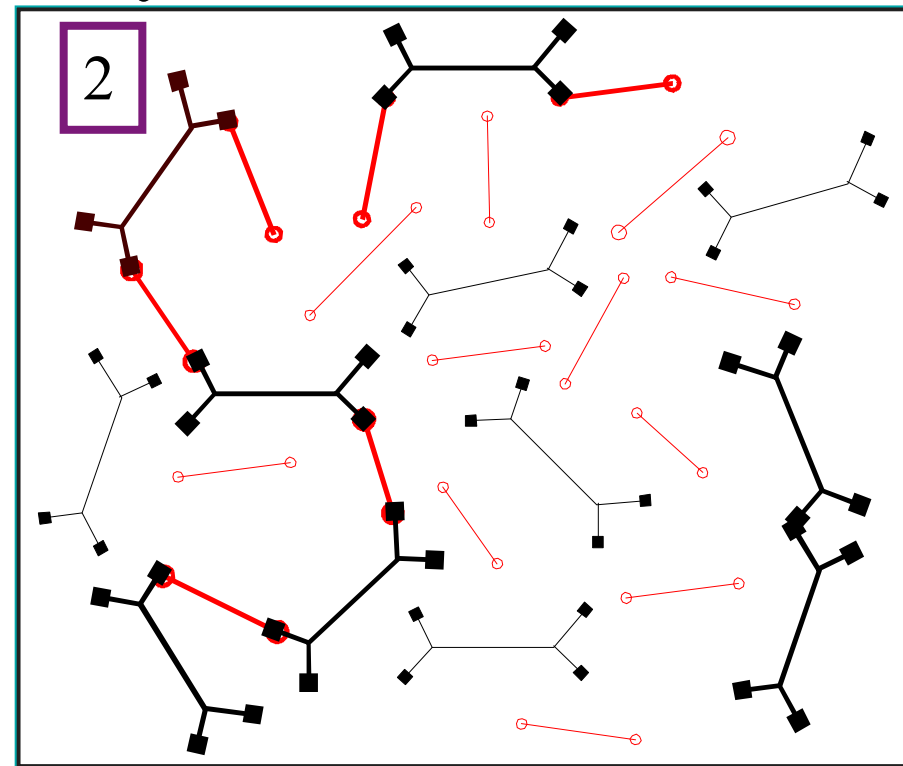
## A.1 Changements de phases polymères thermodurcissables

### A.1.4 Matrices Thermodurcissables : polycondensation (1/3)

#### Début de la réaction



#### Début de la gélification





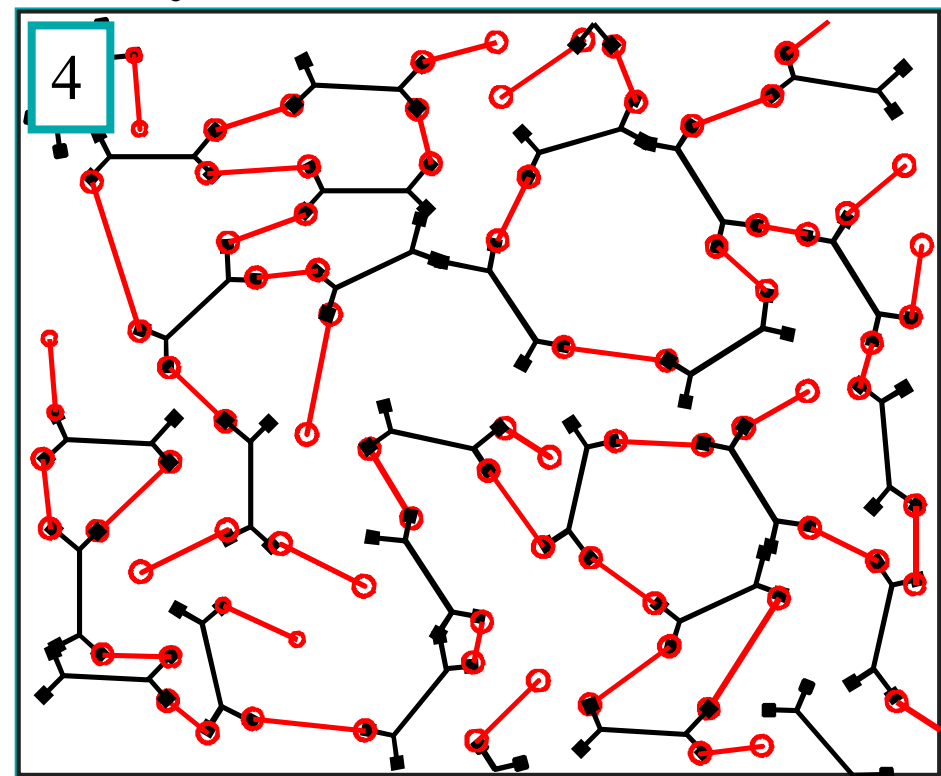
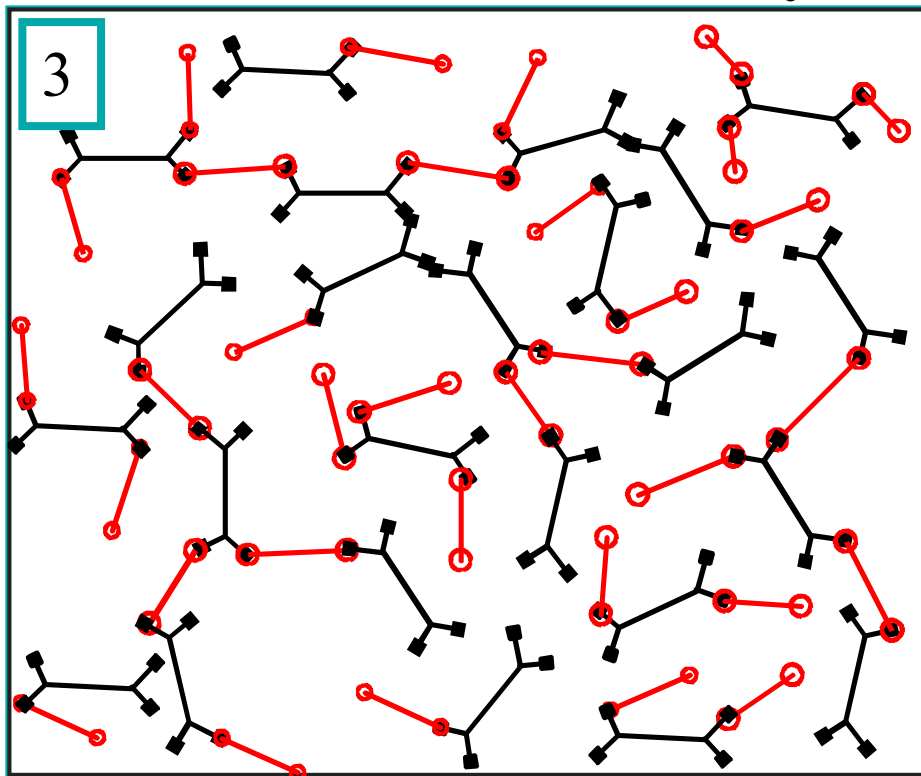
**A**

## A.1 Changements de phases polymères thermodurcissables

### A.1.4 Matrices Thermodurcissables : polycondensation (2/3)

Fin de la gélification

Début de la vitrification



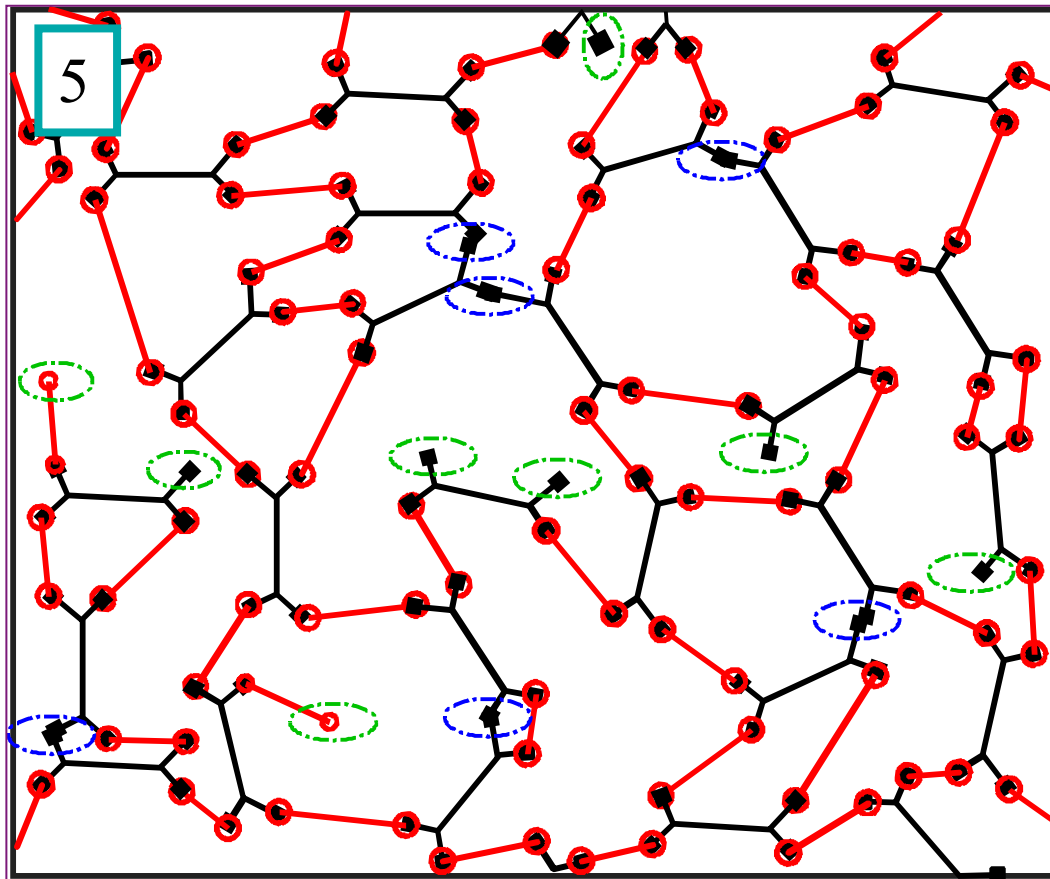


**A**

## A.1 Changements de phases polymères thermodurcissables

### A.1.4 Matrices Thermodurcissables : polycondensation (3/3)

#### Fin de la vitrification.



Fonctions n'ayant pas réticulé



Nœuds de réticulation  
issus d'une homopolymérisation



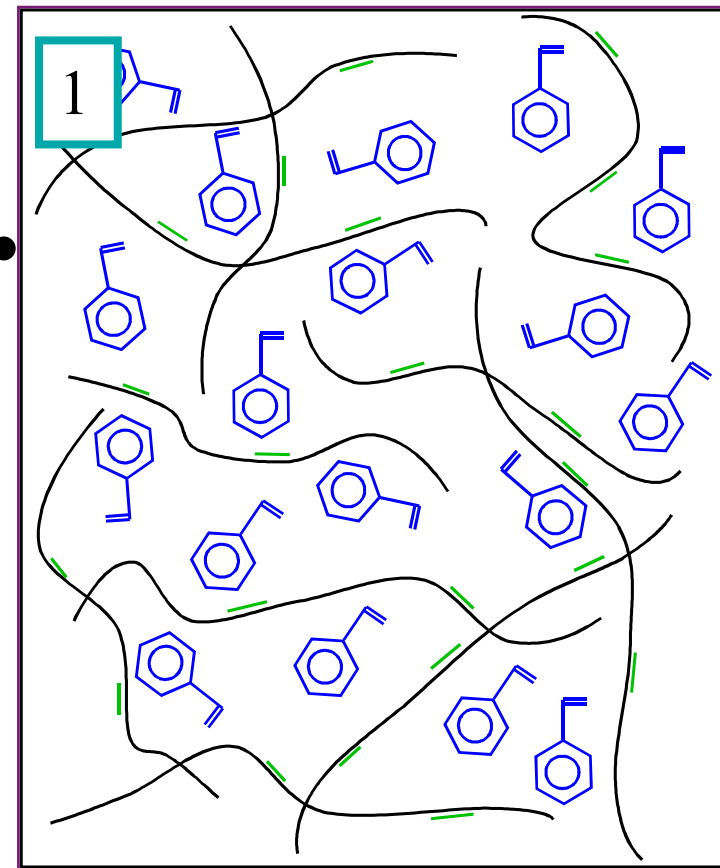
**A**

**A.1 Changements de phases polymères thermodurcissables**

**A.1.5 Matrices Thermodurcissables : réaction en chaîne (1/3)**

**Etat initial**

Macromolécules insaturées,  
c'est à dire comportant une double liaison  
susceptible d'être activée (généralement C=C)  
sont dans une solution de monomère.  
Généralement la solution de monomère  
comporte aussi un catalyseur et un inhibiteur.





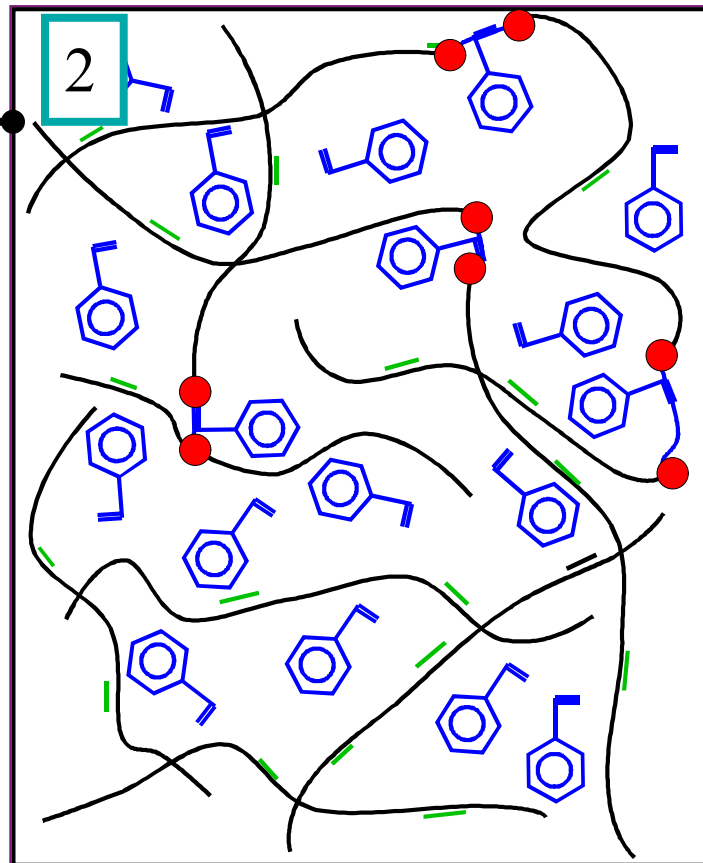
## A

### A.1 Changements de phases polymères thermodurcissables

#### A.1.5 Matrices Thermodurcissables : réaction en chaîne (2/3)

## Gélification

La réaction débute sous l'effet du catalyseur (qui agit comme un amorceur). Suivant les formulations, la réaction peut se faire à la température ambiante ou en température plus élevée.  
Le monomère de la solution réagit avec les doubles liaisons des chaînes macromoléculaires.





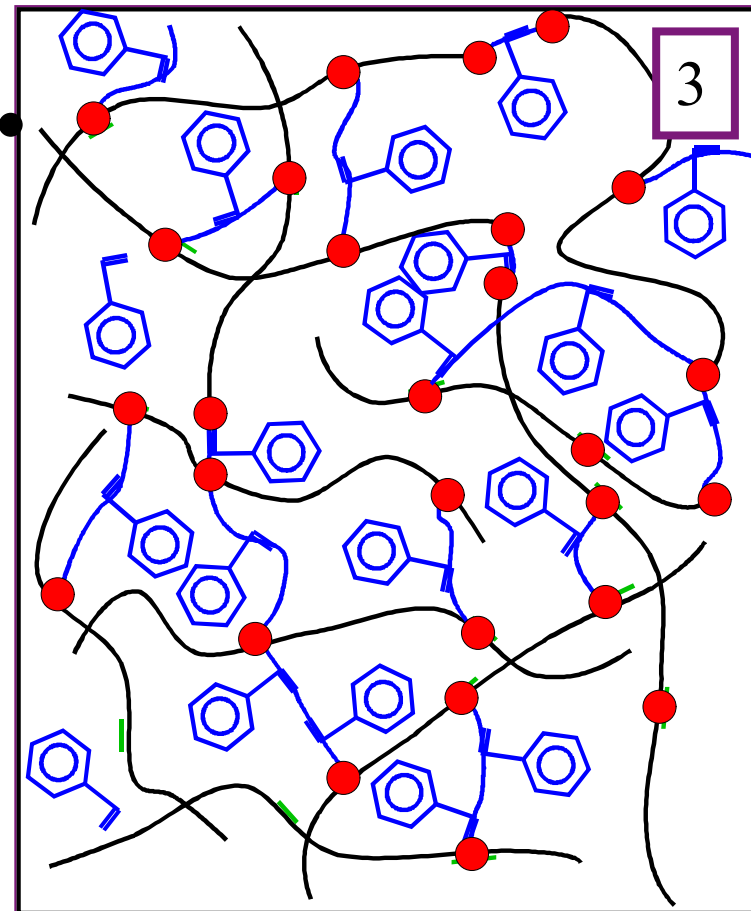
**A**

## A.1 Changements de phases polymères thermodurcissables

### A.1.5 Matrices Thermodurcissables : réaction en chaîne (3/3)

#### Vitrification

Les réactions du monomère avec les doubles liaisons des macromolécules se poursuivent jusqu'à la formation d'une macromolécule tridimensionnelle (ou réseau 3D réticulé).





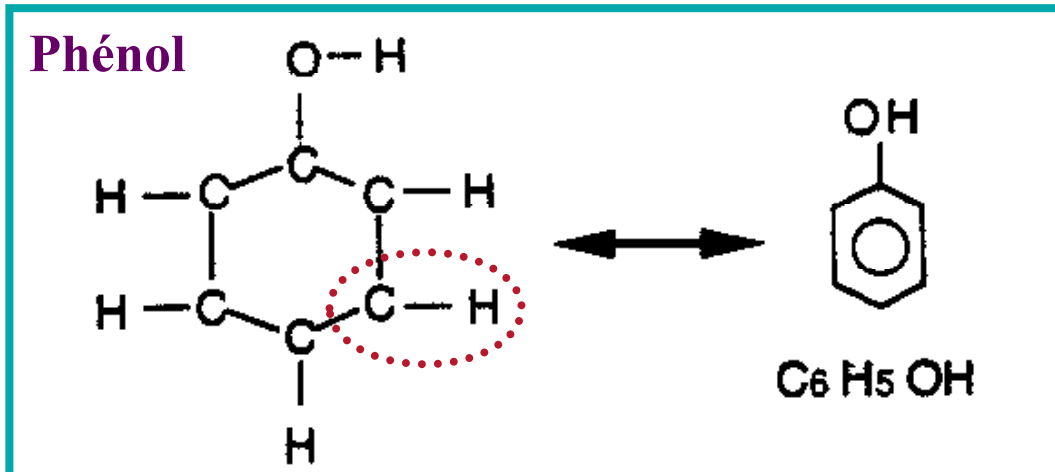
**A**

## A.2 Mécanismes de réaction

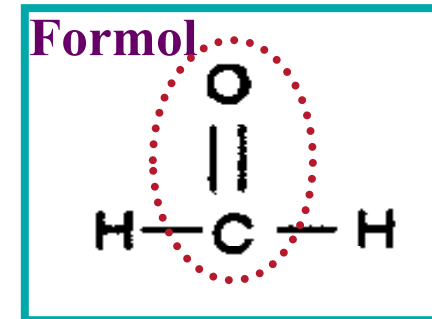
### A.2.1 Matrices thermodurcissables phénoliques

#### Résine phénolique (PF)

Prépolymère monomère



Agent réticulant

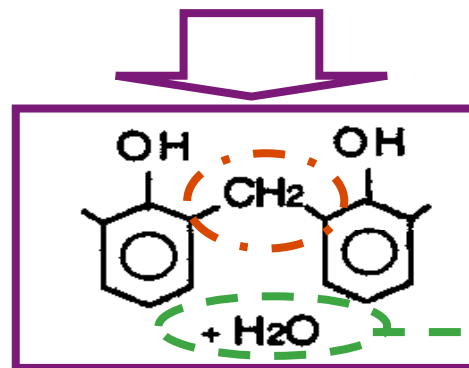
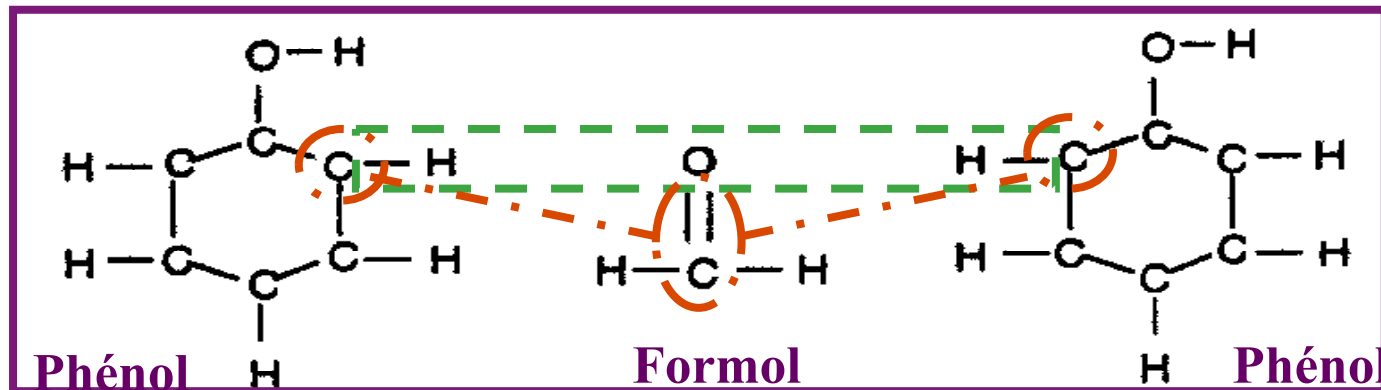




**A**

## A.2 Mécanismes de réaction

### A.2.1 Matrices thermodurcissables phénoliques



Sous produit  
de la réaction  
à éliminer

Conception cycle  
de T° et outillage  
ou produits  
environnement

..... H<sub>2</sub>O .....

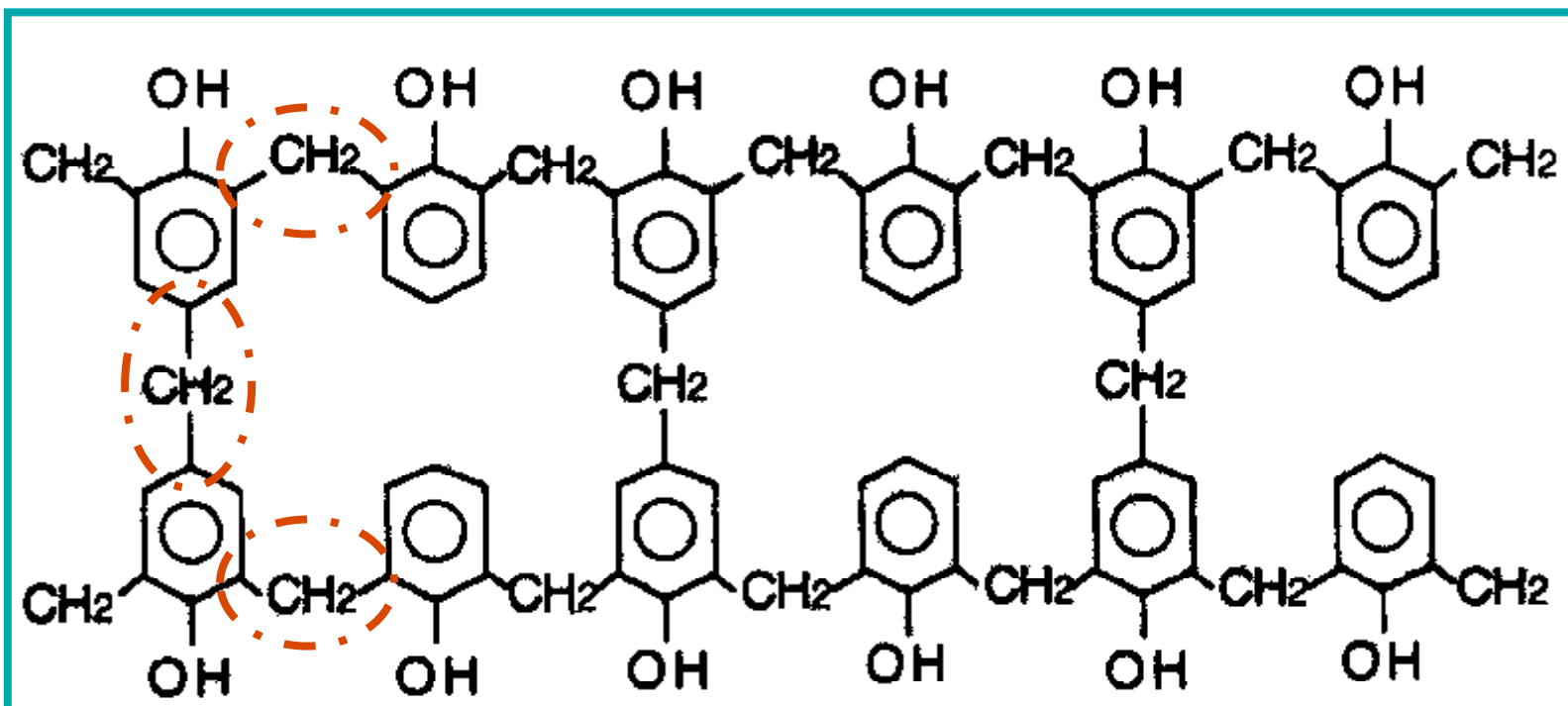




**A**

## A.2 Mécanismes de réaction

### A.2.1 Matrices thermodurcissables phénoliques



+ n fois H<sub>2</sub>O  
à éliminer

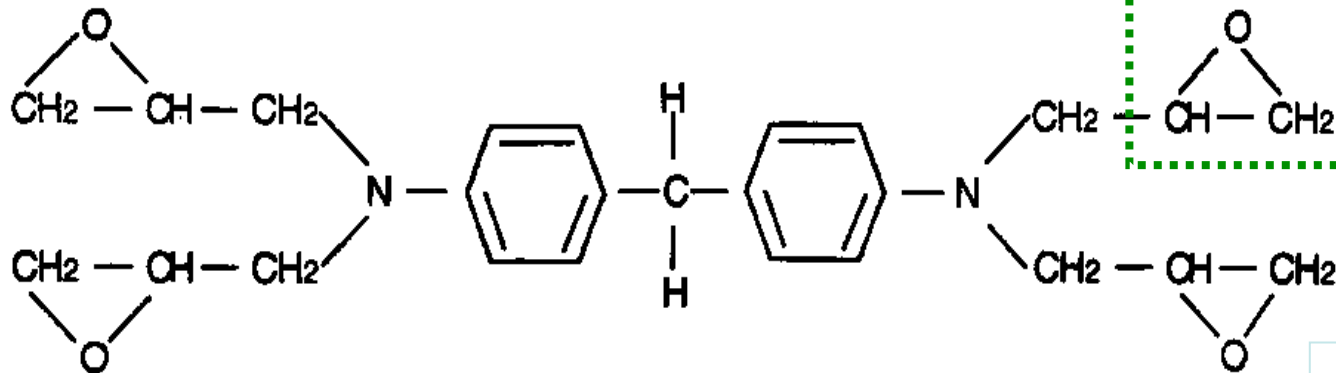


## A

### A.2 Mécanismes de réaction

#### A.2.2 Matrices thermodurcissables époxy

Prépolymère TGMDA (Tétraglycidyl de la méthylène dianiline)

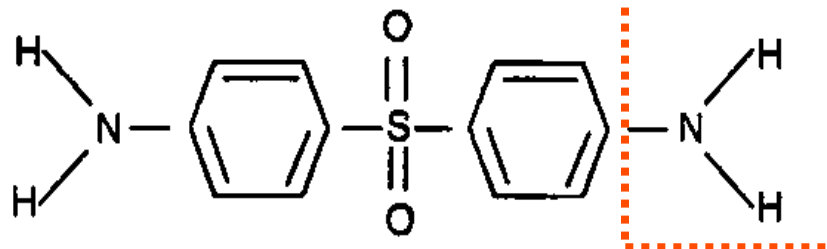


Fonction  
époxyde

Fonctionnalité  
des nœuds :  
(Flory-Stockmayer)  
d° avancement  
au point de gel

$$X_{Agel} X_{Bgel} = \frac{1}{(f-1) \cdot (g-1)}$$

Durcisseur DDS (Diaminophénylsulfone)



diamine

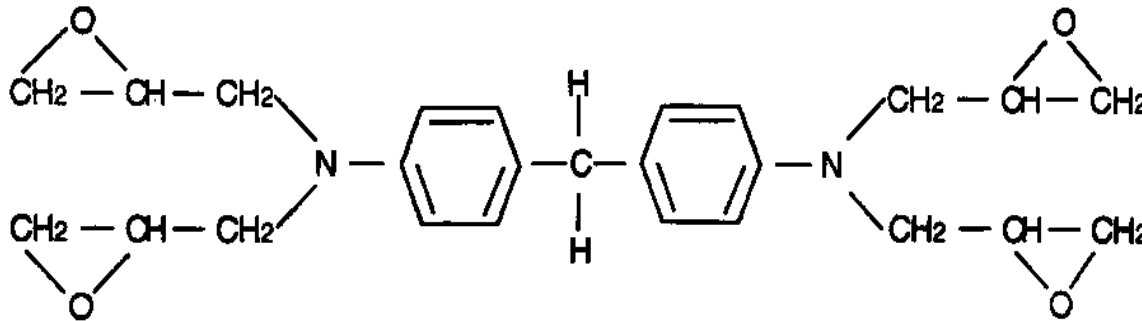


**A**

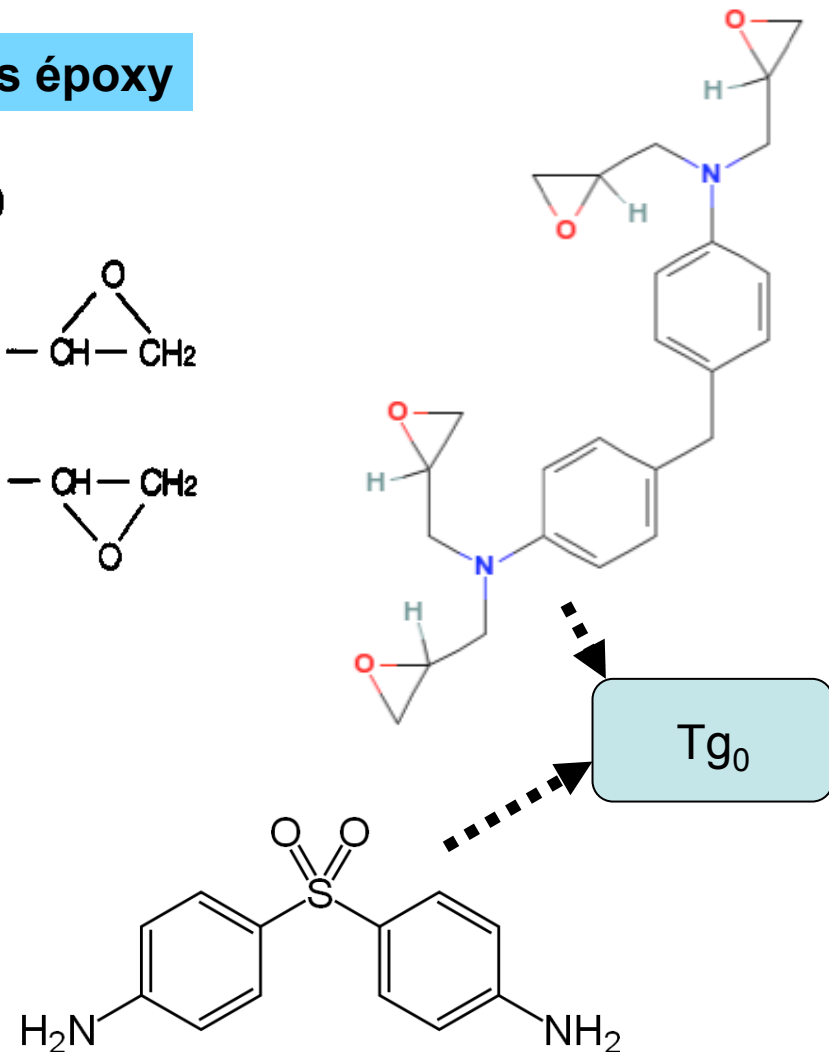
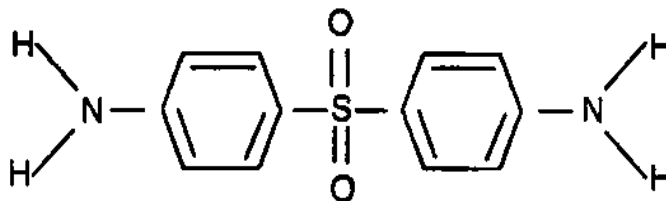
## A.2 Mécanismes de réaction

### A.2.2 Matrices thermodurcissables époxy

Prépolymère TGMDA (Tétraglycidyl de la méthylène dianiline)



Durcisseur DDS (Diaminophénylsulfone)



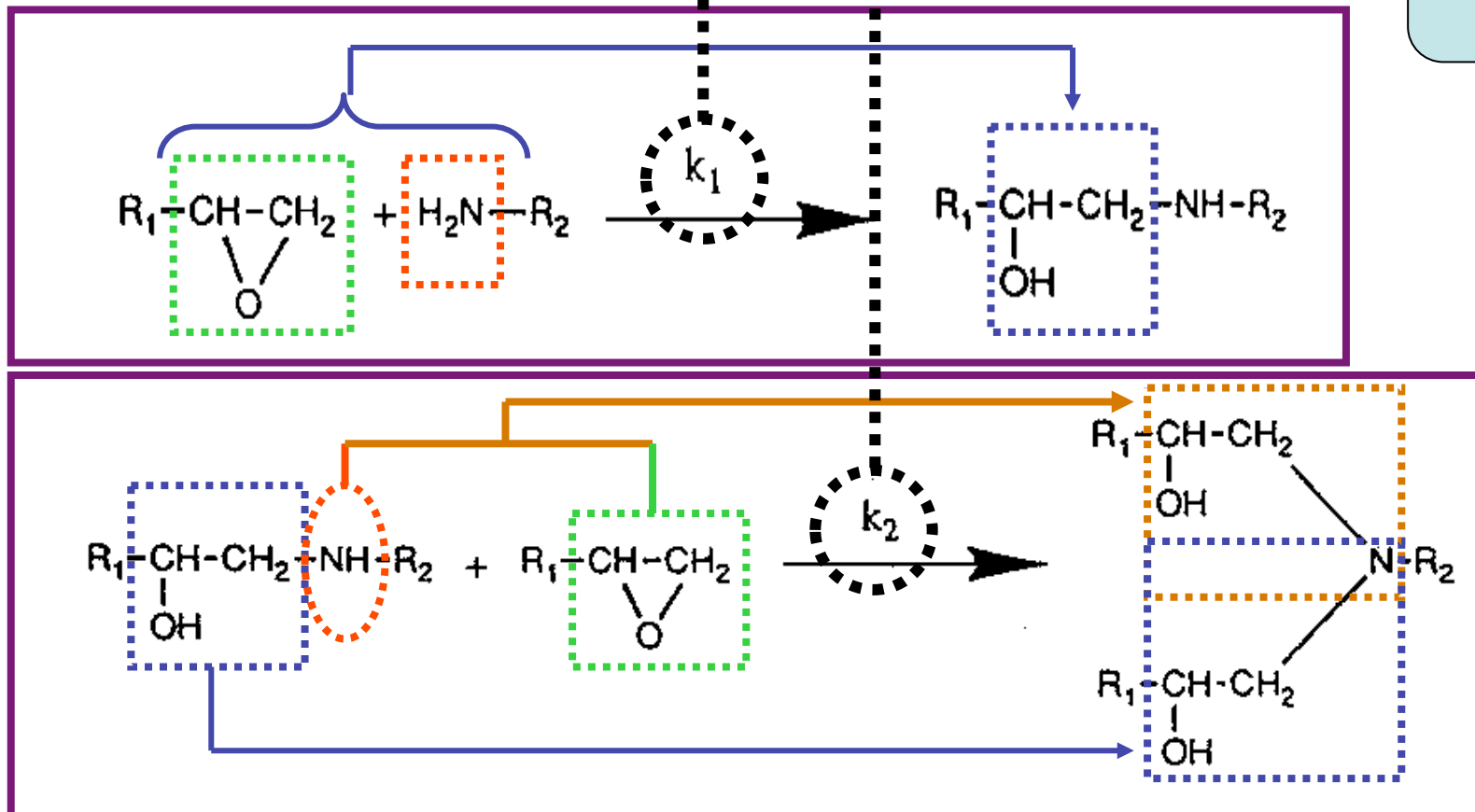


**A**

## A.2 Mécanismes de réaction

### A.2.2 Matrices thermodurcissables époxy

Cinétique de  
réaction **B**





**A**

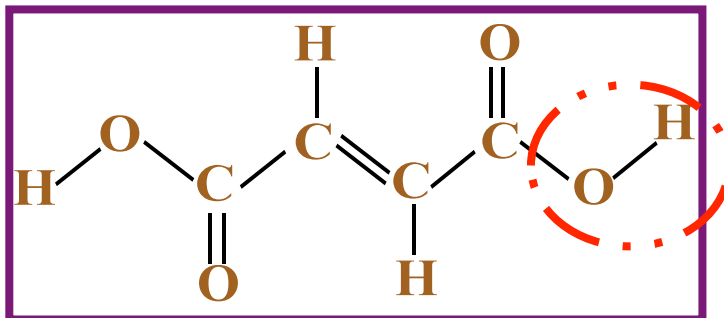
## A.2 Mécanismes de réaction

### A.2.3 Matrices thermodurcissables UP

Résine polyester insaturé (UP)

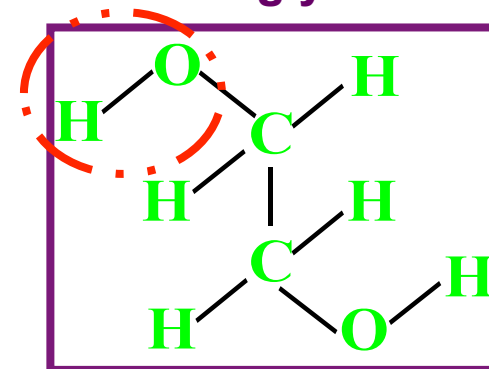
1 Formation des macromolécules de prépolymère

Diacide  
maléique



*Noté (Ra)*

Éthylène  
glycol



*Noté (Reg)*

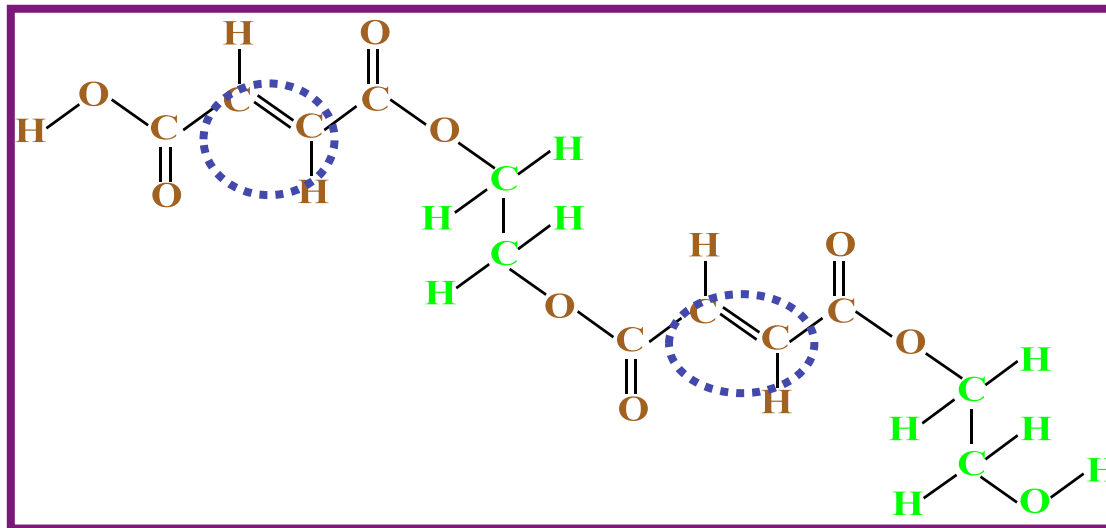


**A**

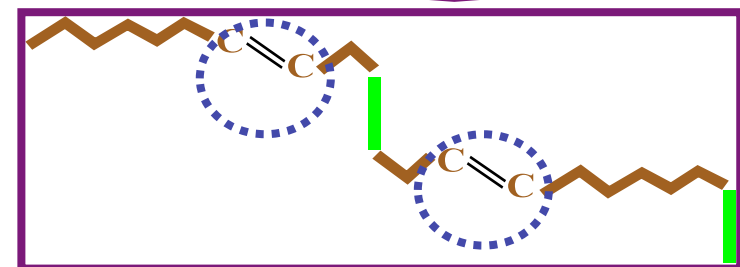
## A.2 Mécanismes de réaction

### A.2.3 Matrices thermodurcissables UP

Réaction de polyestérification : formation du prépolymère



Représentation  
schématique



Eau à éliminer



**A**

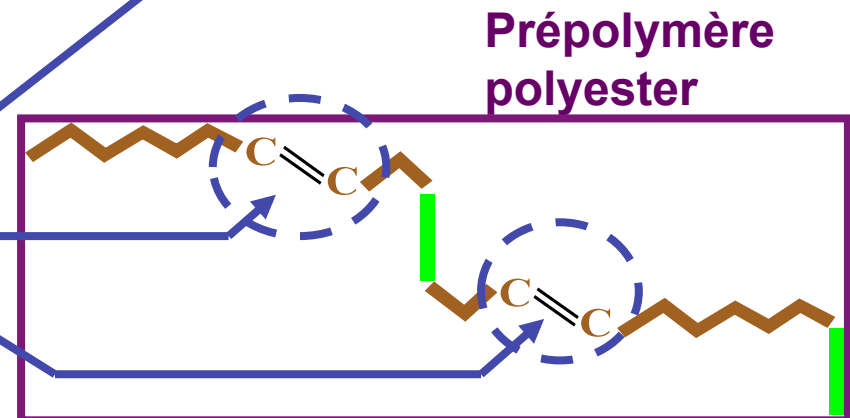
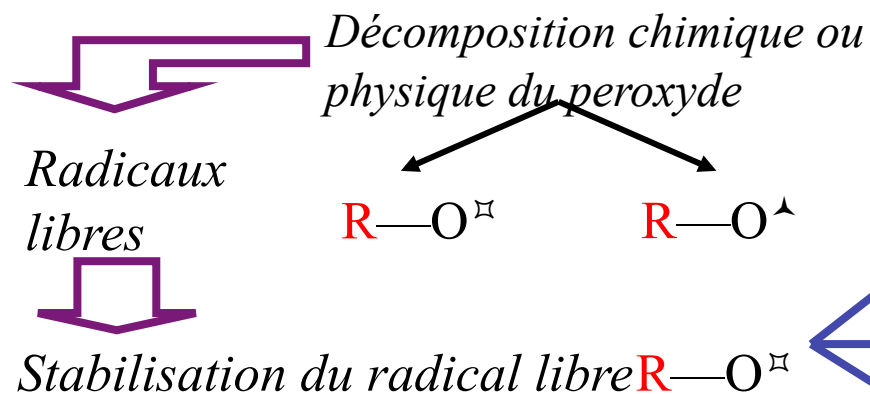
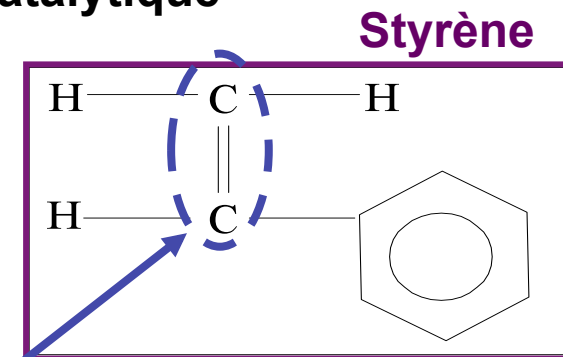
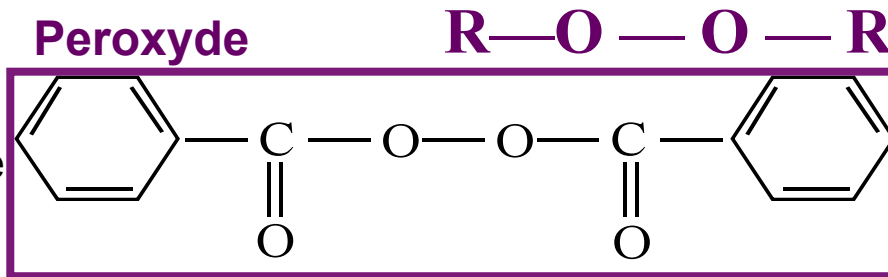
## A.2 Mécanismes de réaction

### A.2.3 Matrices thermodurcissables UP

2

#### Copolymérisation avec du styrène + système catalytique

Exemple :  
Peroxyde de  
benzoyle



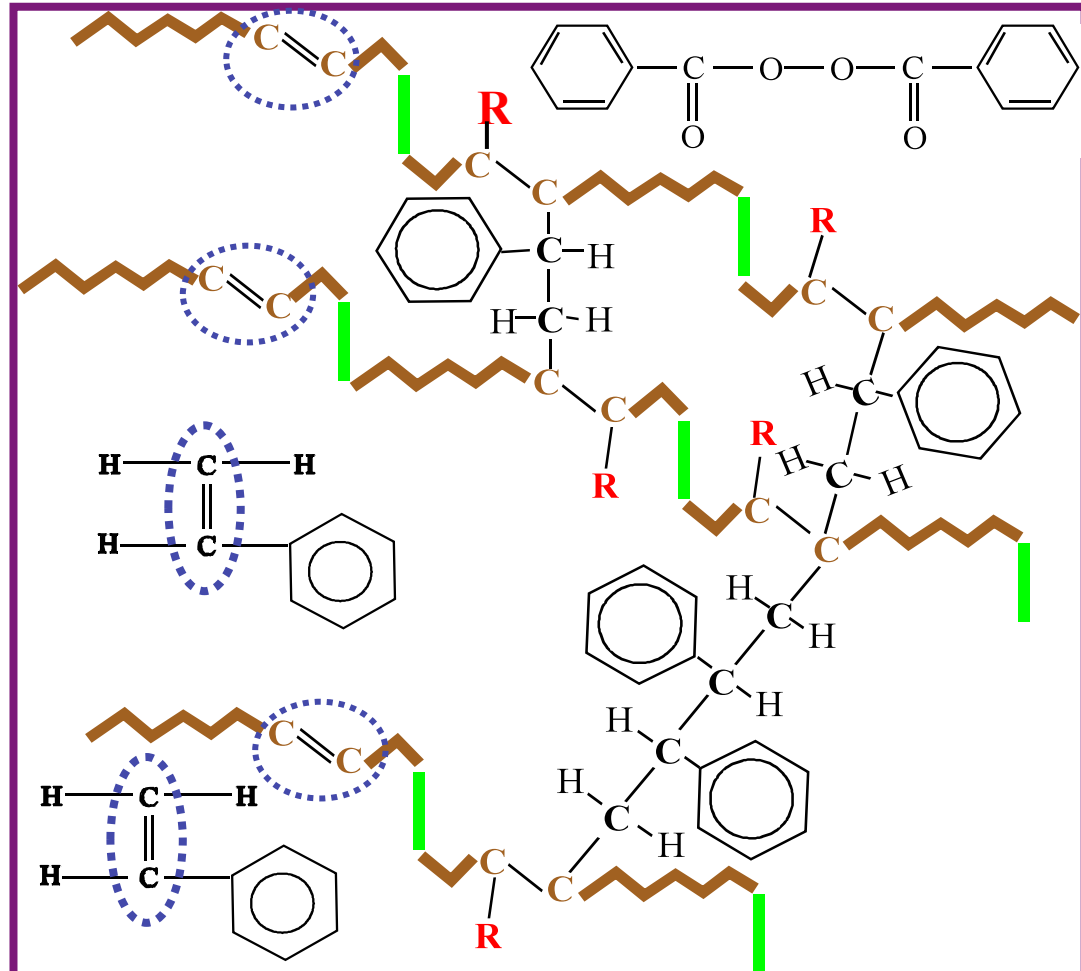


## A

### A.2 Mécanismes de réaction

#### A.2.3 Matrices thermodurcissables UP

Formation du réseau  
macromoléculaire 3D







**A**

## A.2 Mécanismes de réaction

### A.2.3 Matrices thermodurcissables UP

### Systemes Polyesters Insaturés industriels

#### Imprégnation manuelle

- Prépolymère + Styrène : 100 parts
- Amorceur de réaction : 1 part
- Thermoplastiques : 20 parts

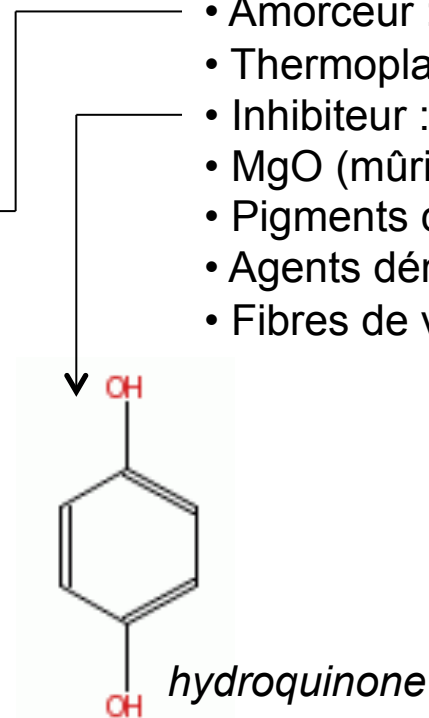
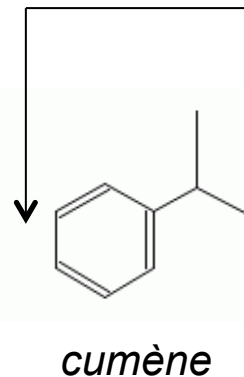
incompressibilité

Stabilité  
dimensionnelle

formulation / comportement en production

#### Moulage par compression SMC, BMC

- Prépolymère : 100 parts
- Styrène : 40 parts
- Amorceur : 1 part
- Thermoplastiques : 20 parts
- Inhibiteur : 1 part
- MgO (mûrissement) : 3 parts
- Pigments coloration
- Agents démoulants
- Fibres de verre :  $V_f = 20$  à  $60$  %



Forces frottement  
interface SMC/moule



Éléments sur la cinétique de  
réaction et la rhéologie

**B**



## B

### B.1 Phénoménologie (polycondensation – systèmes époxy)

- Réaction 1 ( $k_1$ )
    - Amine primaire + époxyde → amine secondaire et alcool secondaire
  - Réaction 2 ( $k_2$ )
    - Amine secondaire et alcool secondaire + époxyde → amine tertiaire et 2 alcool secondaires
  - Réaction 3 (estérification et homopolymérisation) ( $k_2$ )
    - Alcool secondaire + époxyde → éther et alcool secondaire
    - Se produit si excès de fonction époxy ou basicité très faible de l'amine (DDS) ou introduction d'accélérateurs.
- Caractère autocatalytique de la réaction époxy/amines car accumulation de groupement hydroxyles durant la réaction



## B

### B.2 types de modèles cinétiques

- Modèles mécanistiques
  - Basés sur le nombre et la nature des groupements fonctionnels, et la concentration des réactifs (Flammershein-Riccardi, Smith-Horie...)
- Modèles phénoménologiques
  - Sourour et Kamal
  - Smith et Horie
  - Ordre n
  - Sourour et Kamal + facteur de diffusion
  - Bailleul (polynomial réactions en chaîne)



**B**

**B.3 Modèles Cinétiques Phénoménologiques Courants**

→ *Hypothèse non catalytique*

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(\alpha_{\max} - \alpha)^n \quad \text{Ordre } n$$

→ *Hypothèse autocatalytique*

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha)(\alpha_{\max} - \alpha)^2 \quad \text{Smith Horie}$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left( k_1 + k_2\alpha^m \right) (\alpha_{\max} - \alpha)^n \quad \text{Kamal Sourour} \quad \text{où } K_i = A_i \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \quad (\text{cin-3})$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = K_1(T) \cdot (\alpha_{\max} - \alpha)^{n_1} + K_2(T) \cdot \alpha^m \cdot (\alpha_{\max} - \alpha)^{n_2} \quad \text{Lee}$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = K(T) \cdot G(\alpha) \quad \text{avec } K(T) = K_{\text{réf}} \cdot \exp\left[-A \left(\frac{T_{\text{réf}}}{T} - 1\right)\right] \quad \text{Bailleul}$$

$$(\text{cin-2}) \quad \alpha(t) = \frac{H(t)}{H_{\text{totale}}}$$

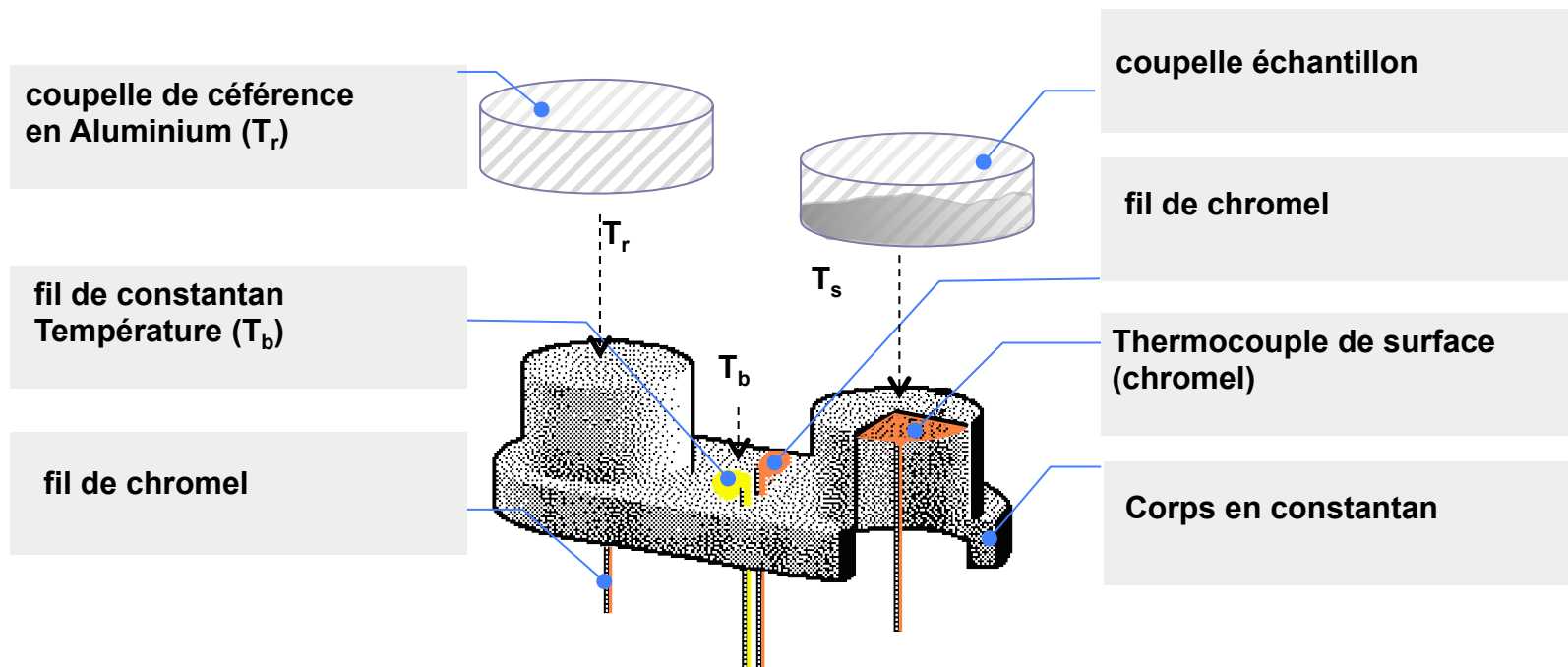
$\alpha$ , degré d'avancement de  
la réaction de réticulation  
(rapport d'enthalpies)



## B

### B.4 Analyse expérimentale cinétique

#### B.4.1 Dispositif

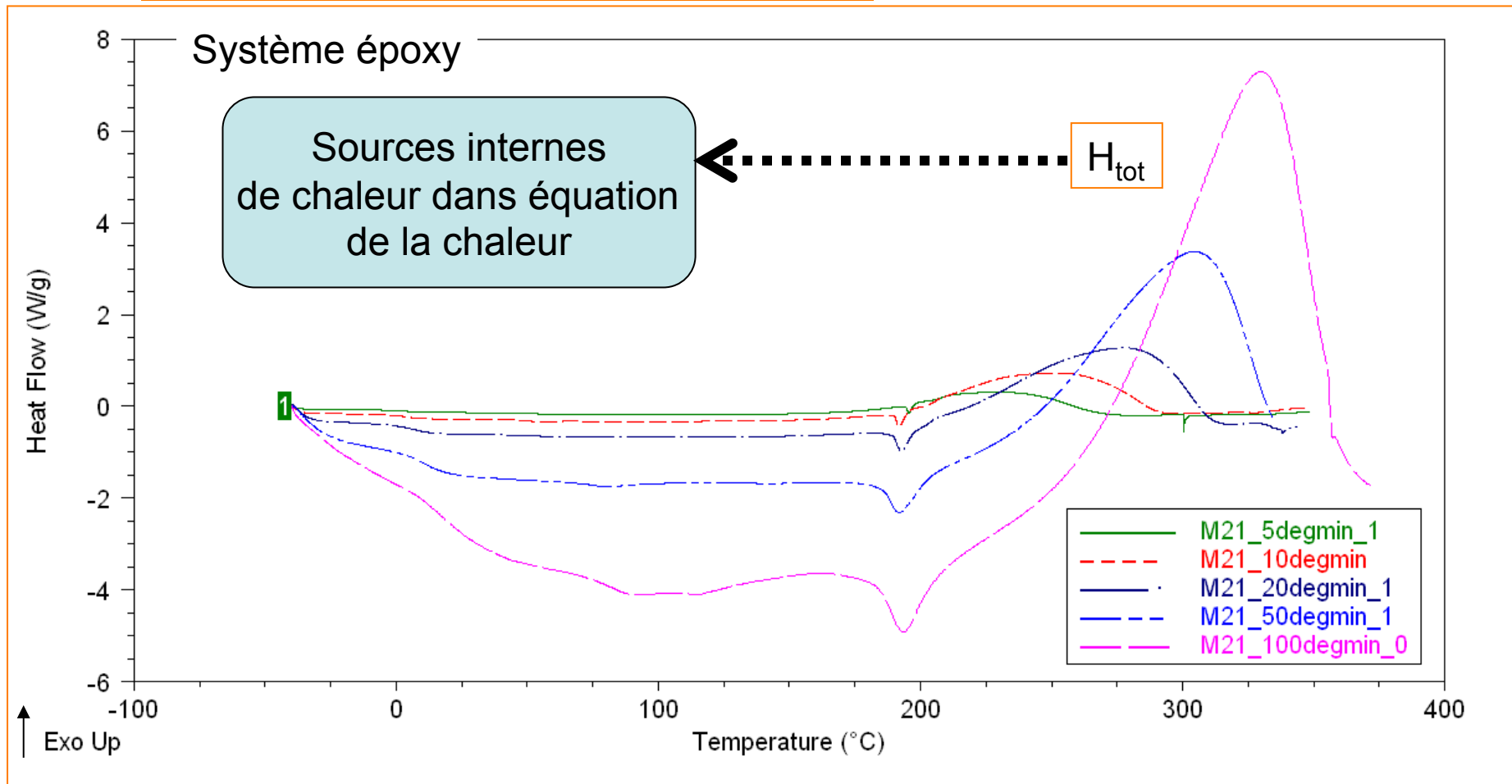




## B

### B.4 Analyse expérimentale cinétique

#### B.4.2 Thermogrammes en dynamique

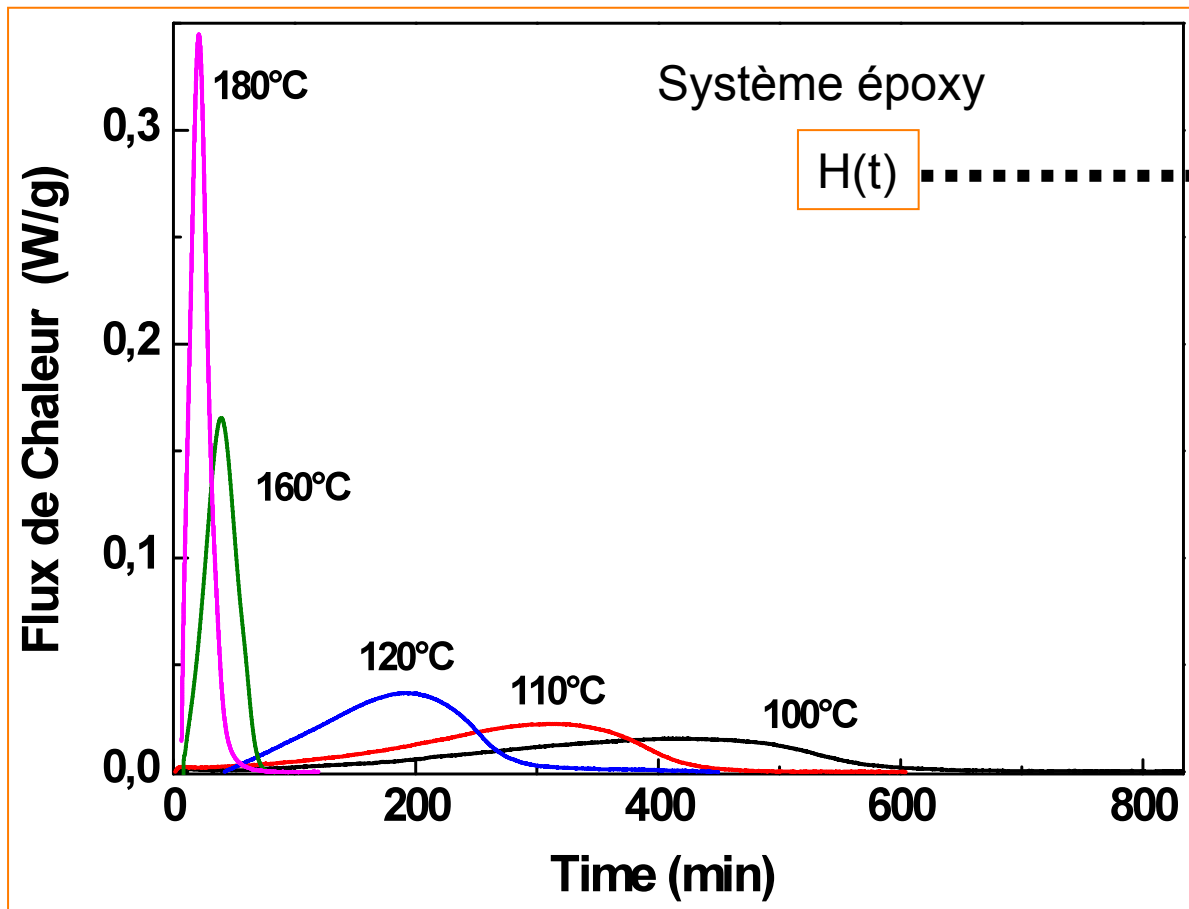




**B**

## B.4 Analyse expérimentale cinétique

### B.4.2 Thermogrammes en isotherme



Sources internes  
de chaleur dans équation  
de la chaleur

$$H(t) = \int_0^t \frac{dH}{dt} dt \quad (\text{cin-1})$$

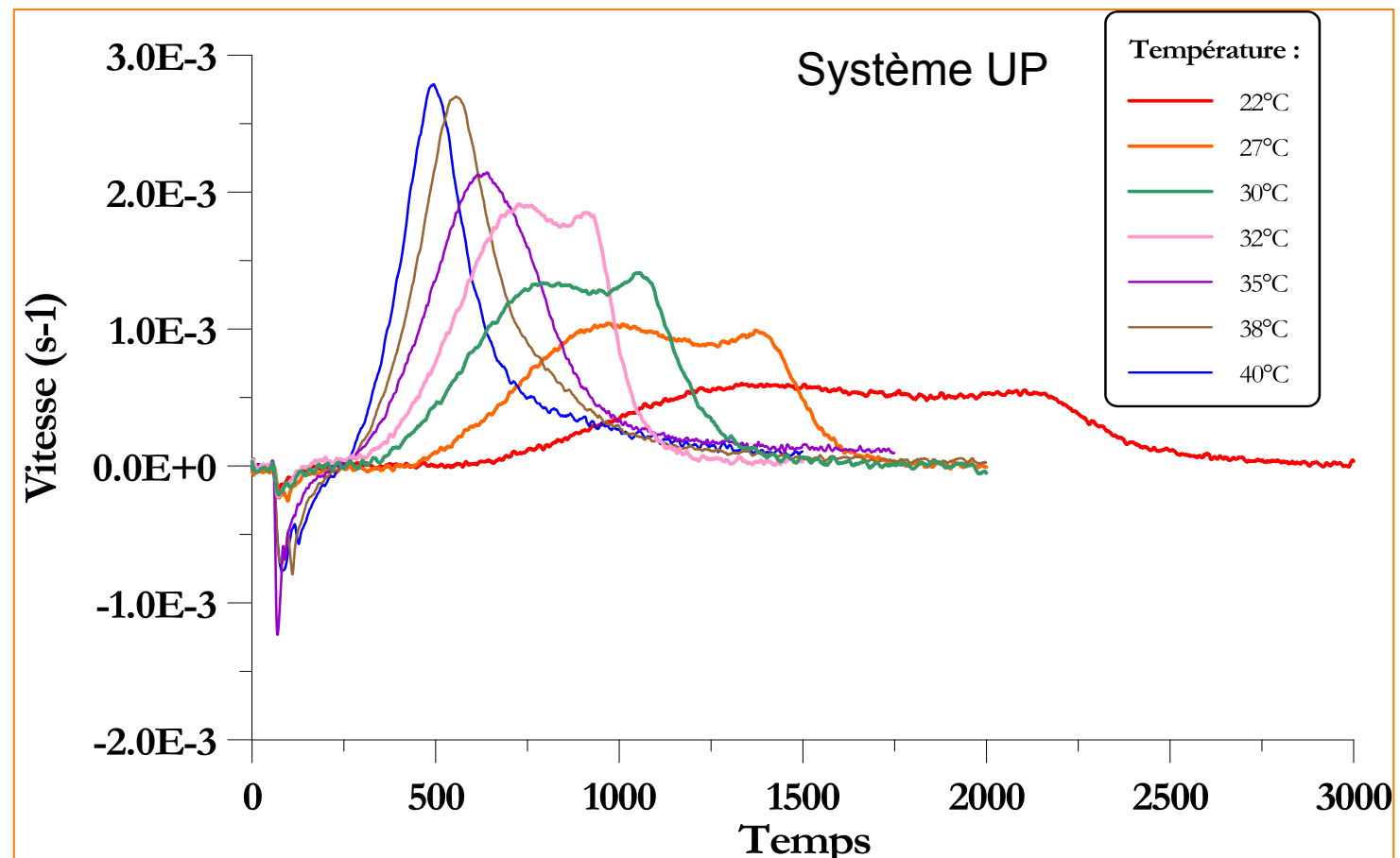




## B

### B.4 Analyse expérimentale cinétique

#### B.4.2 Thermogrammes en isotherme





**B** B.5 Analyse expérimentale / Modélisation cinétique

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left( k_1 + k_2 \alpha^m \right) (\alpha_{\max} - \alpha)^n \quad (\text{Kamal-Sourour})$$

$$\alpha_{\max} = \frac{T_{g0} \cdot T_{g\infty}}{(T_{g0} - T_{g\infty}) \cdot T} - \frac{T_{g\infty}}{(T_{g0} - T_{g\infty})} \quad (\text{cin-4})$$

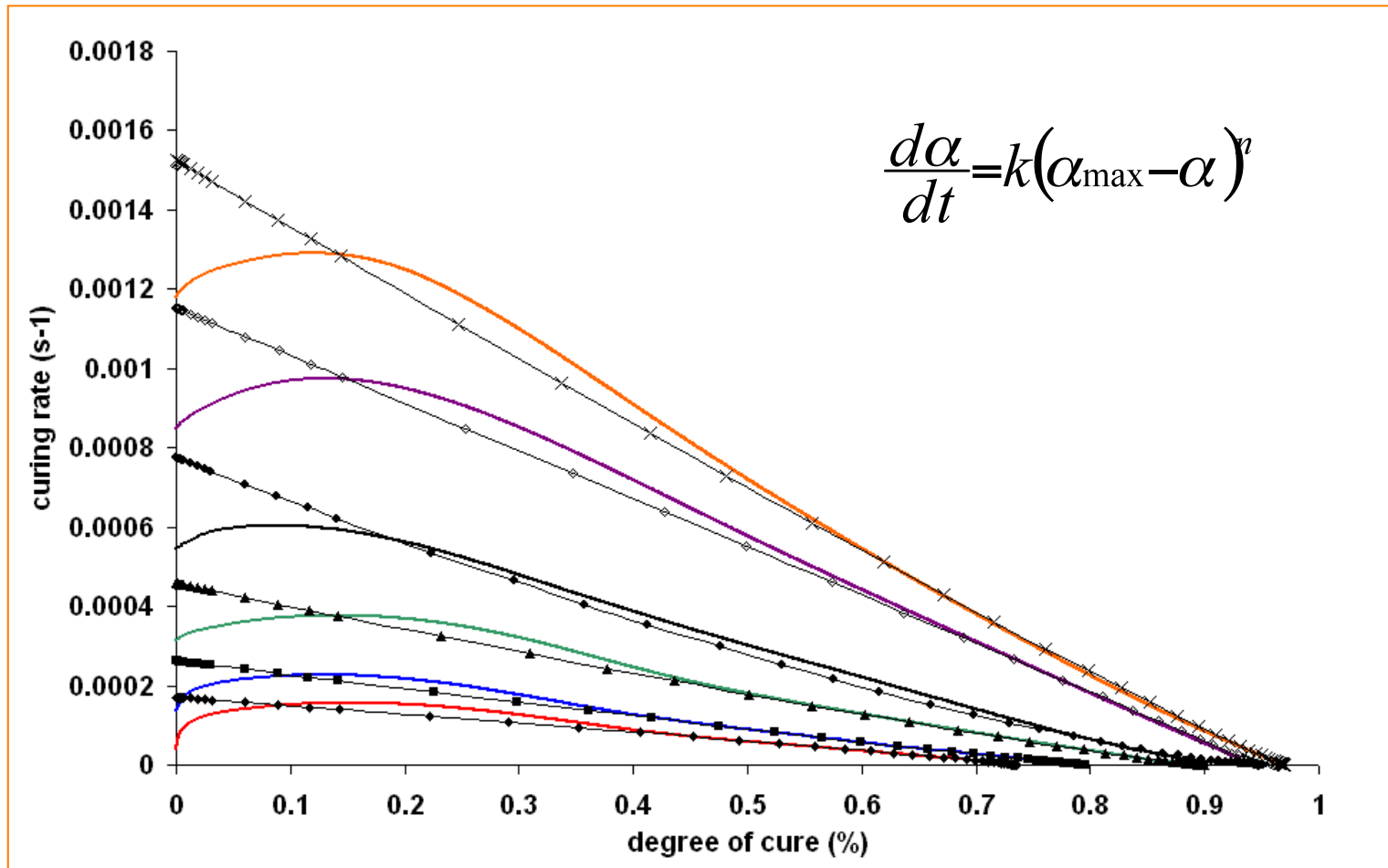
$$K_i = A_i \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \quad (\text{cin-3})$$



**B**

## B.5 Analyse expérimentale / Modélisation cinétique

Vitesse de réaction exp. / modèle ordre n

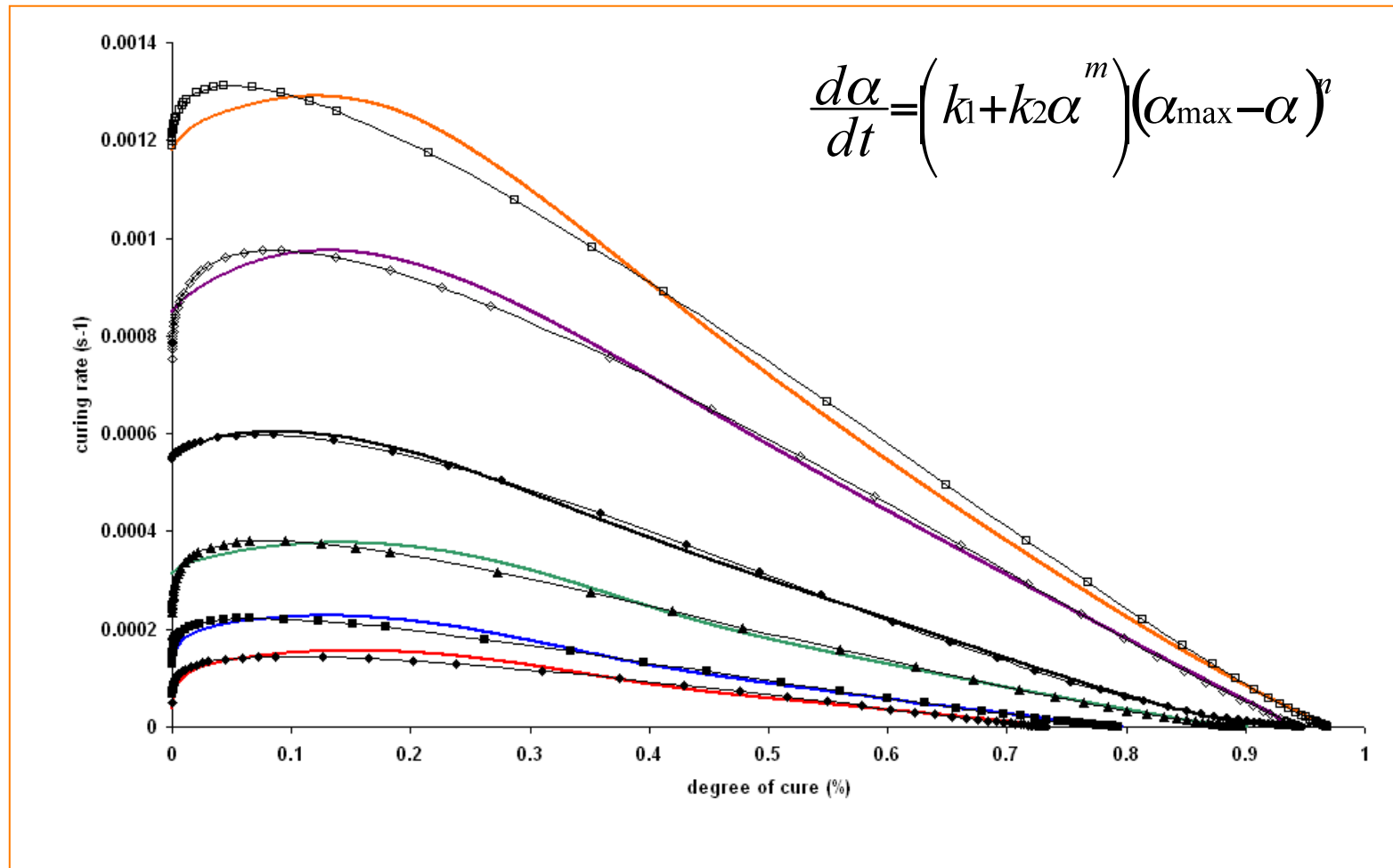




**B**

## B.5 Analyse expérimentale / Modélisation cinétique

Vitesse de réaction exp. / modèle Sourour Kamal



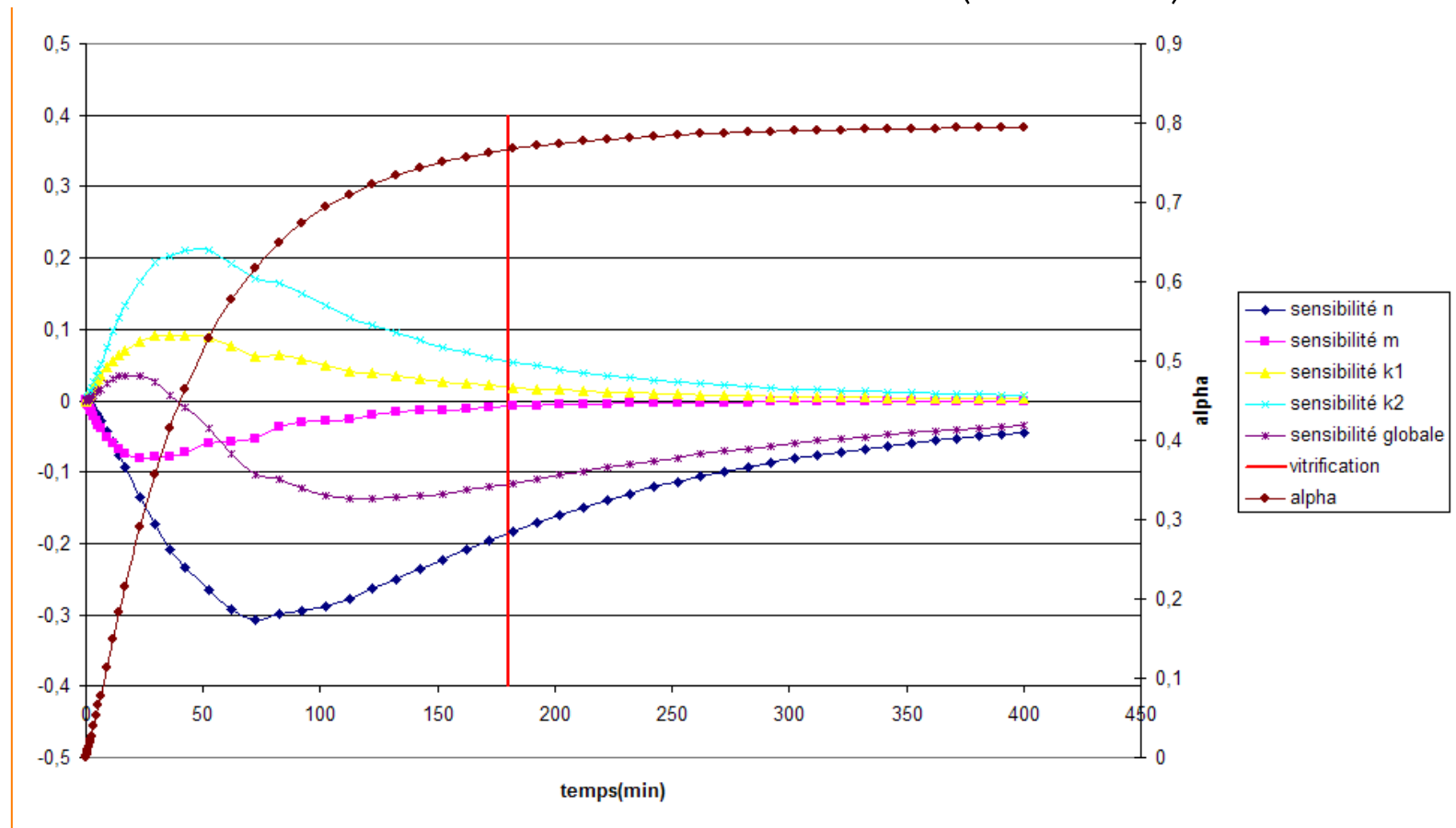


**B**

## B.6 Analyse expérimentale / Modélisation / paramètres du modèle cinétique

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left( k_1 + k_2 \alpha^m \right) (\alpha_{\max} - \alpha)^n$$

Sensibilité à 170°C Perturbation introduite : 1% 170 2





**B**

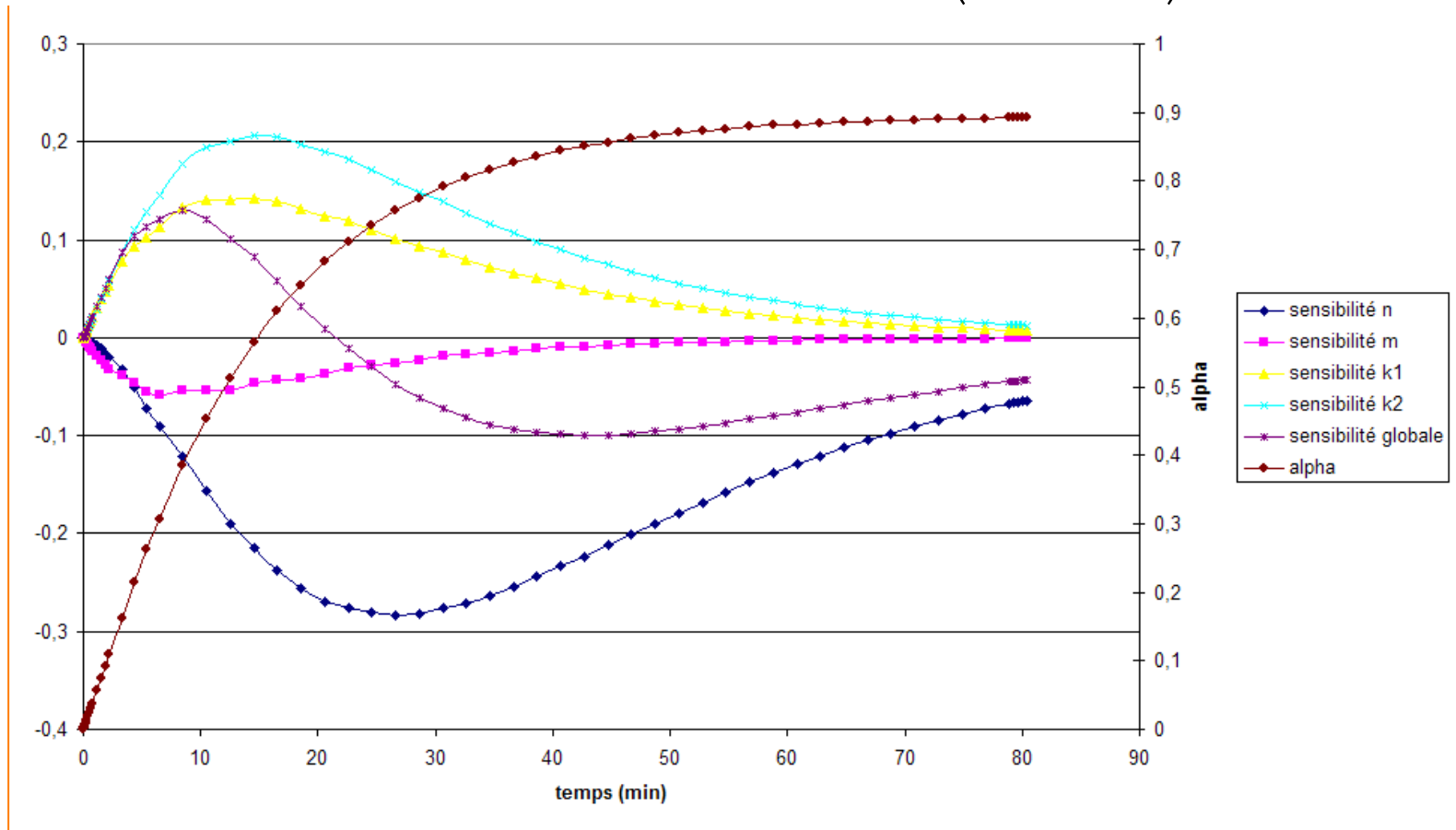
## B.6 Analyse expérimentale / Modélisation / paramètres du modèle cinétique

Sensibilité à 200°C

Perturbation introduite : 1%

200 2

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left( k_1 + k_2 \alpha^m \right) (\alpha_{\max} - \alpha)^n$$





**B**

**B.6 Analyse expérimentale / Modélisation /  
paramètres du modèle cinétique**

Analyse de sensibilité :

Les évolutions de  $k_1$  et  $k_2$  sont corrélées,

les réactions chimiques sont donc couplées et ont lieu au même moment.

réactions

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left( k_1 + k_2 \alpha^m \right) (\alpha_{\max} - \alpha)^n \quad (\text{Kamal-Sourour})$$



## B

### B.7 Changements de phase : Tg

#### B.7.1 Evolution de Tg avec le degré d'avancement $\alpha$ de la réaction ???

Paramètre évoluant lors de la réticulation :  $\overline{M}_C$  masse moléculaire moyenne entre nœuds de réticulation (en g/mol).

- Densité de réticulation faible  $\longrightarrow$   $\overline{M}_C$  grande et  $Tg = Tg_L$  (Tg du polymère linéaire de  $\overline{M}_n = \infty$ )
- Densité de réticulation élevée  $\longrightarrow$   $\overline{M}_C$  faible et Tg = élevée proche de  $Tg_\infty$

Exemple : Système époxy VANTICO HYLY 5052

Durée de la cuisson à 125°C (en min.)	Tg (°C) (DSC)	$\alpha$ (%) (DSC)	$\overline{M}_c$ (g/mol) (Nielsen, 1969)	E vitreux (Instron) (MPa)
5	119	90	245,3	1710
15	124	93	237,8	2280
25	129	100	232,1	2510
35	124	100	237,8	2060
45	122	100	240,7	1910





**B**

**B.7 Changements de phase : Tg**

**B.7.2 Modèles de prédiction de Tg**

*Utilisation du modèle de Di-Benedetto*

$$\frac{Tg - Tg_0}{Tg_0} = \frac{\left[ \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \frac{F_x}{F_0} \right] \cdot X}{1 - \left( 1 - \frac{F_x}{F_0} \right) \cdot X} \quad (\text{di-ben-1}) \quad \text{si } X=1 \Rightarrow Tg = Tg_\infty \Rightarrow$$

- $\varepsilon_x/\varepsilon_m$  : rapport des énergies de réseaux au degré d'avancement  $X$  ou  $\alpha$  et à l'état initial  $m$
- $F_x/F_m$  : rapport de la mobilité des segments aux deux états

Problème : détermination de  $\varepsilon_x/\varepsilon_m$  et de  $F_x/F_m$  ???

$$\text{Si } F_x/F_m = \lambda \quad (\text{di-ben-2})$$

Donc connaissant  $Tg_0$  et  $Tg_\infty$  on peut prévoir l'évolution de  $Tg$  en fonction de  $X$  (ou  $\alpha$ ) pour différentes valeurs du paramètre  $\lambda$



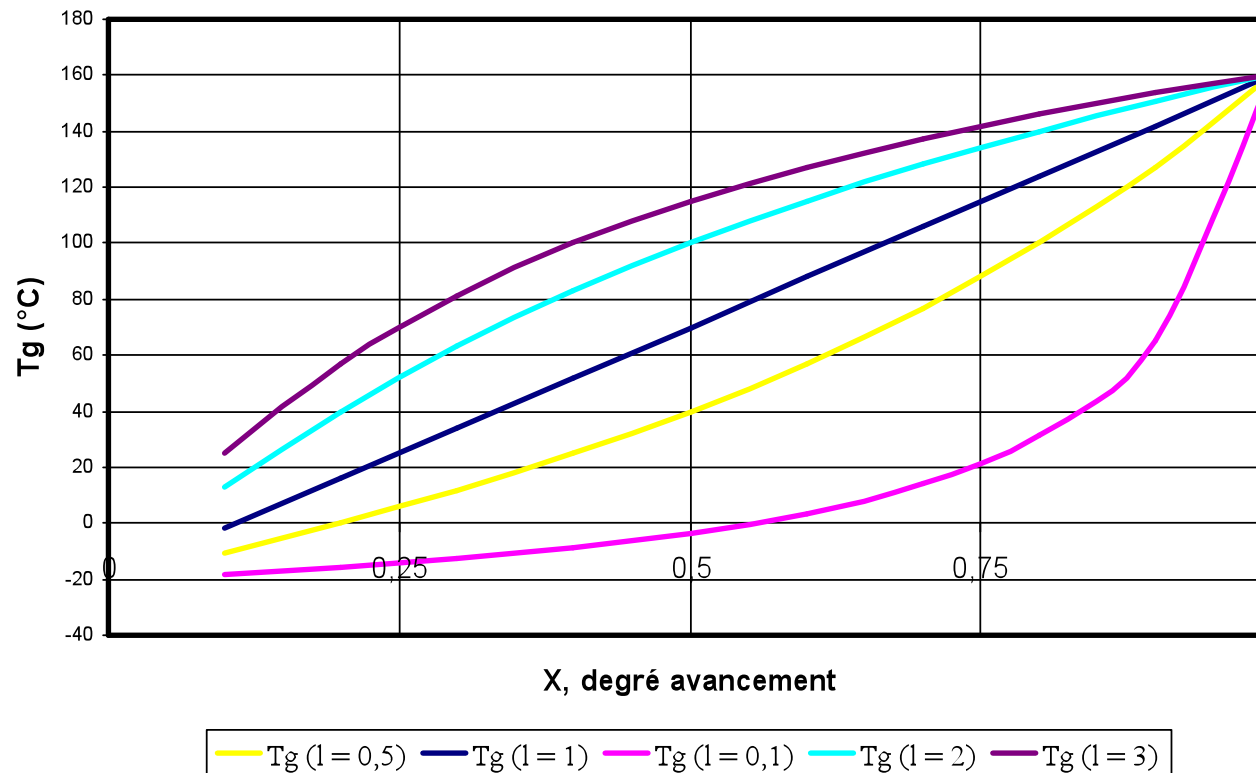
**B**

## B.7 Changements de phase : Tg

### B.7.2 Modèles de prédiction de Tg

*Utilisation du modèle de  
Di-Benedetto*

DI-benedetto / LAMBDA

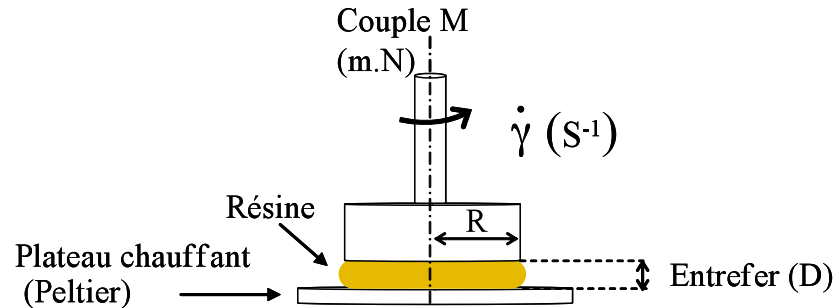




**B**

## B.8 Comportement rhéologique

### B.8.1 Conditions Expérimentales



### B.8.2 Modèles

$$\eta = \eta_{\infty} \cdot \exp(k \cdot t) \quad \text{Mussati (1973) (rhéo-1)}$$

P.B. : ignore les changements de phases

$$\text{(rhéo-2)} \quad n\eta = n\eta_0 + \frac{E_{a\eta}}{R \cdot T} + \int k_i \cdot \exp\left(\frac{E_{ak}}{R \cdot T}\right) \cdot dt \quad \text{Modèle type Arrhénius}$$

couplage énergie activation visqueuse et énergie activation cinétique

Contrainte de cisaillement  $\tau = \frac{2M}{\pi R^3}$

Vitesse de cisaillement  $\gamma = \frac{R\omega}{D}$

Viscosité  $\mu = \frac{\tau}{\gamma}$

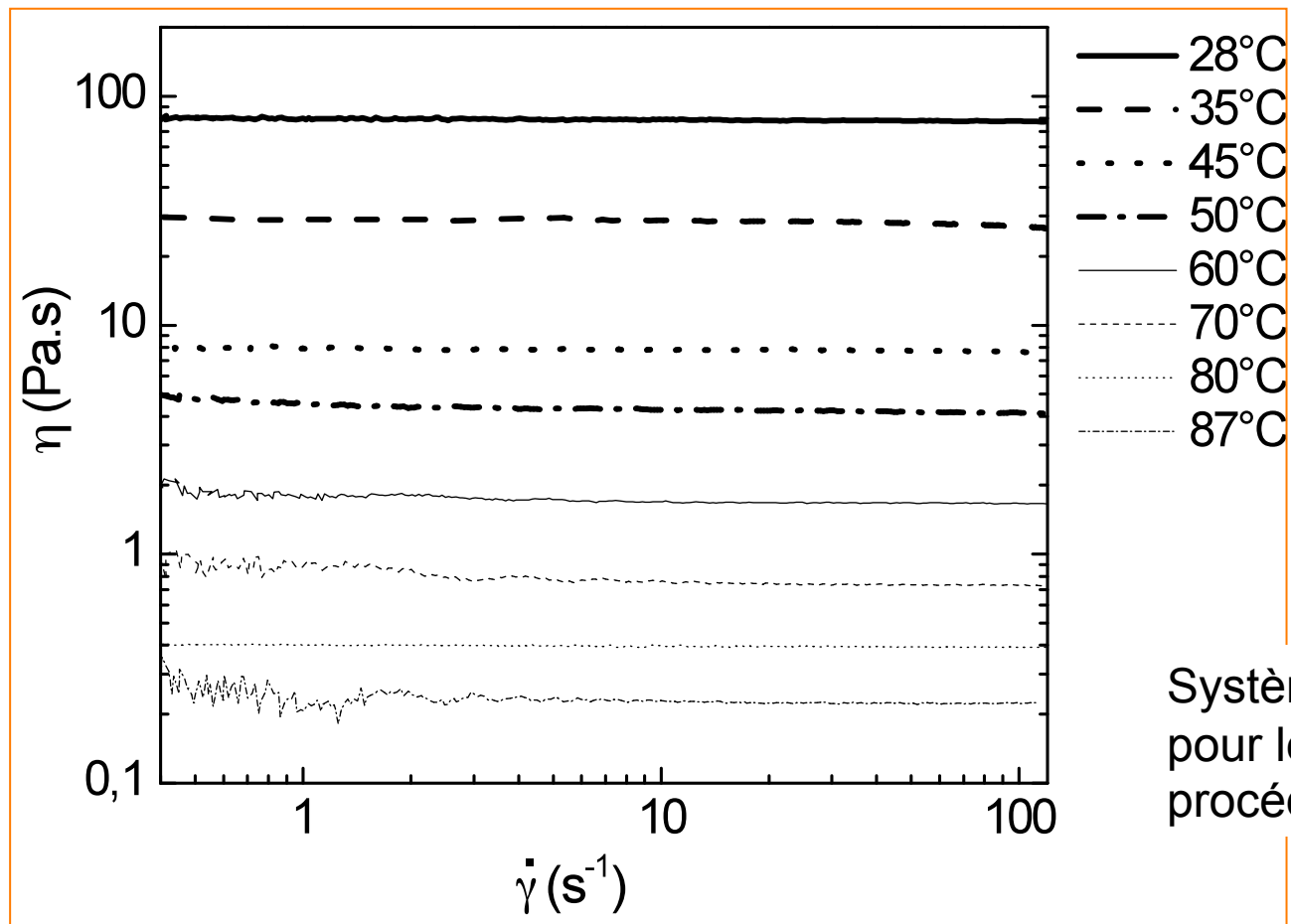


**B**

## B.8 Comportement rhéologique

### B.8.3 Résultats expérimentaux

*C'est pas newtonien ça !!!*



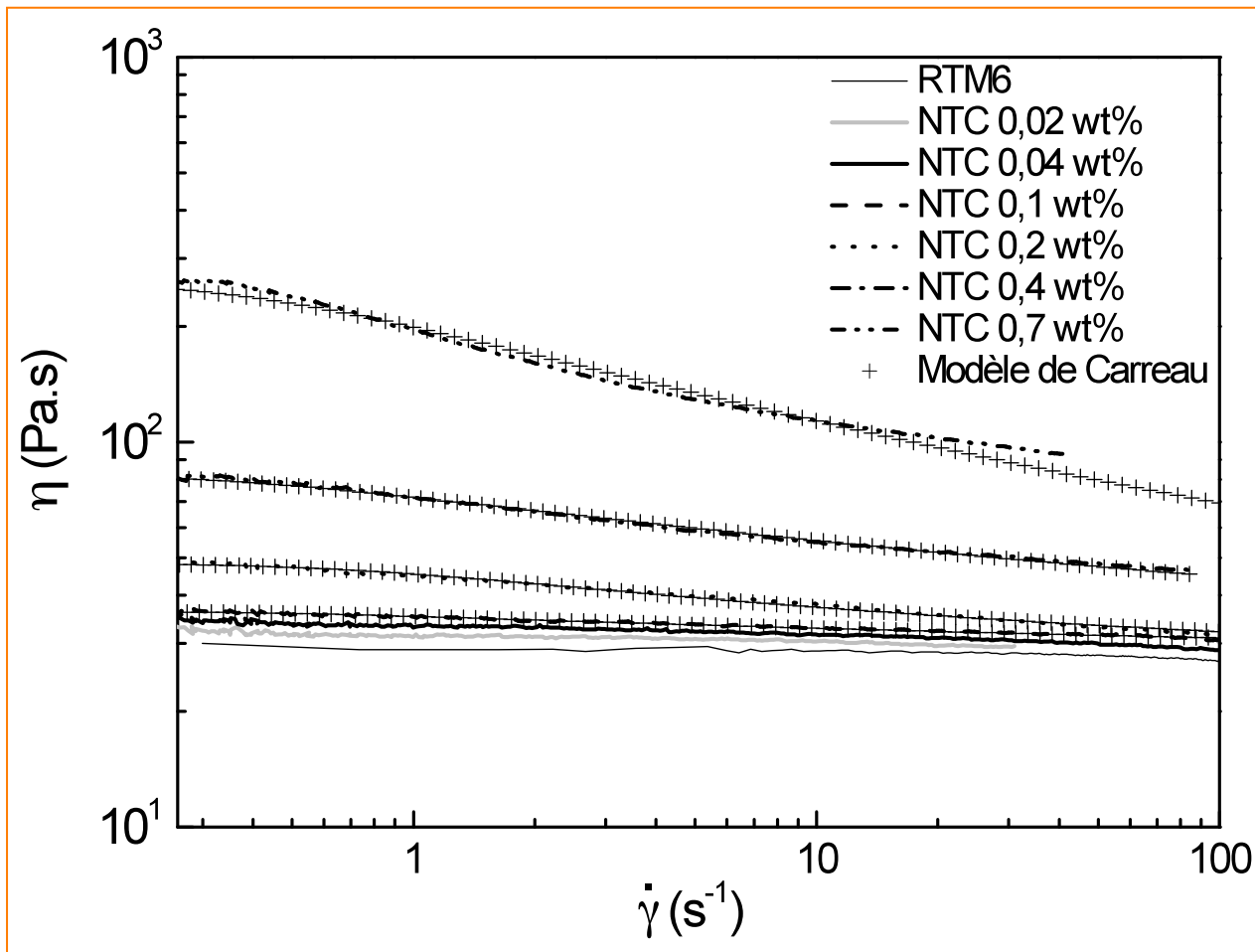
Système époxy  
pour le  
procédé RTM



## B

### B.8 Comportement rhéologique

#### B.8.3 Résultats expérimentaux



Le même système  
époxy pour le  
procédé RTM  
mais chargé de  
MWCNT ( $W_t < 1\%$ )  
non fonctionnalisés

*C'est plus newtonien !!!*

Charges dans matrice

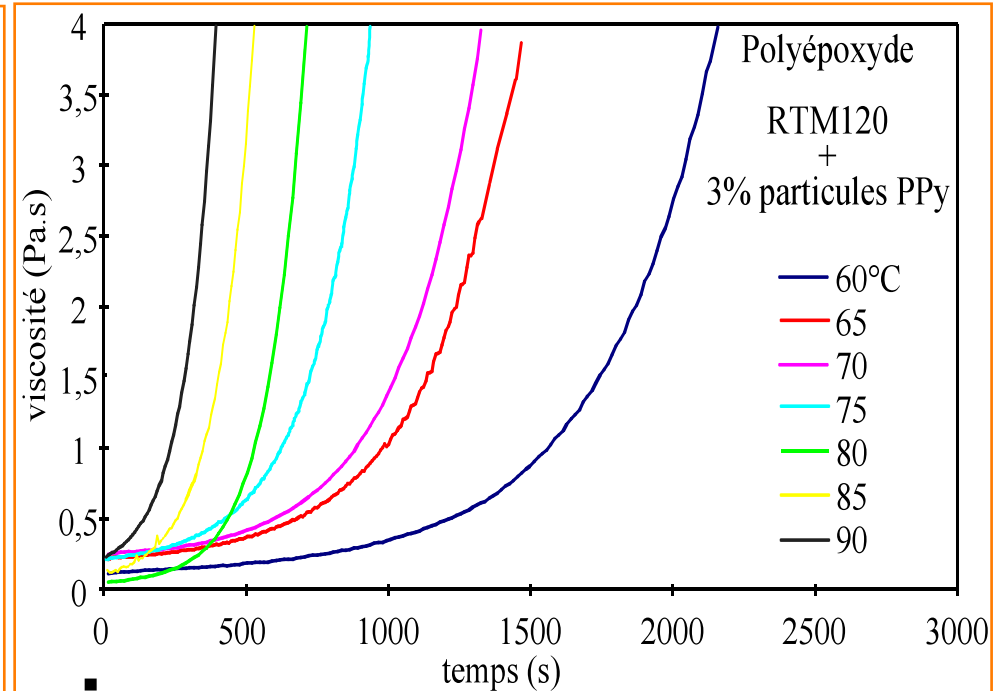
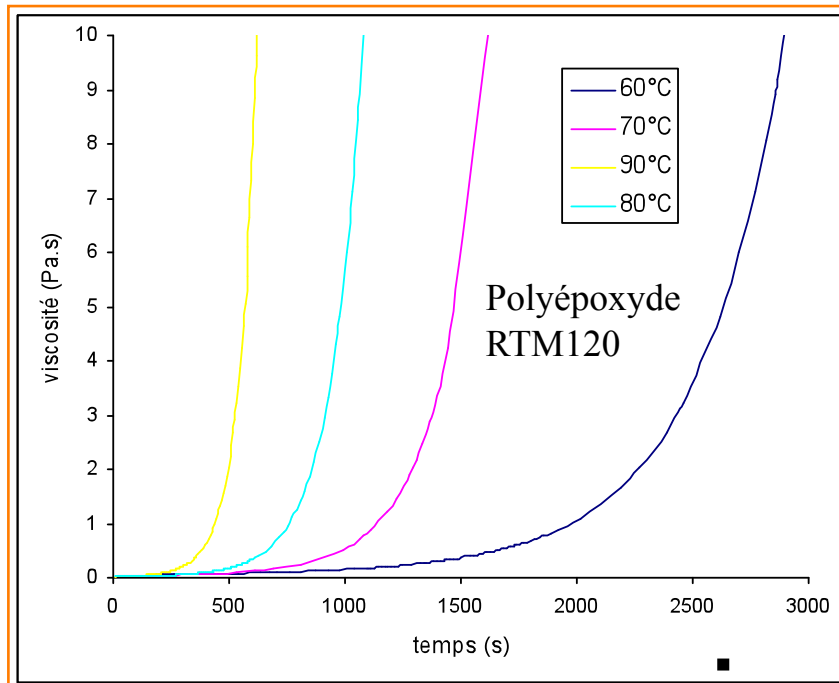
Changement du modèle  
ou paramètres  
du modèle rhéologique



**B**

## B.8 Comportement rhéologique

### B.8.3 Résultats expérimentaux



Charges dans matrice

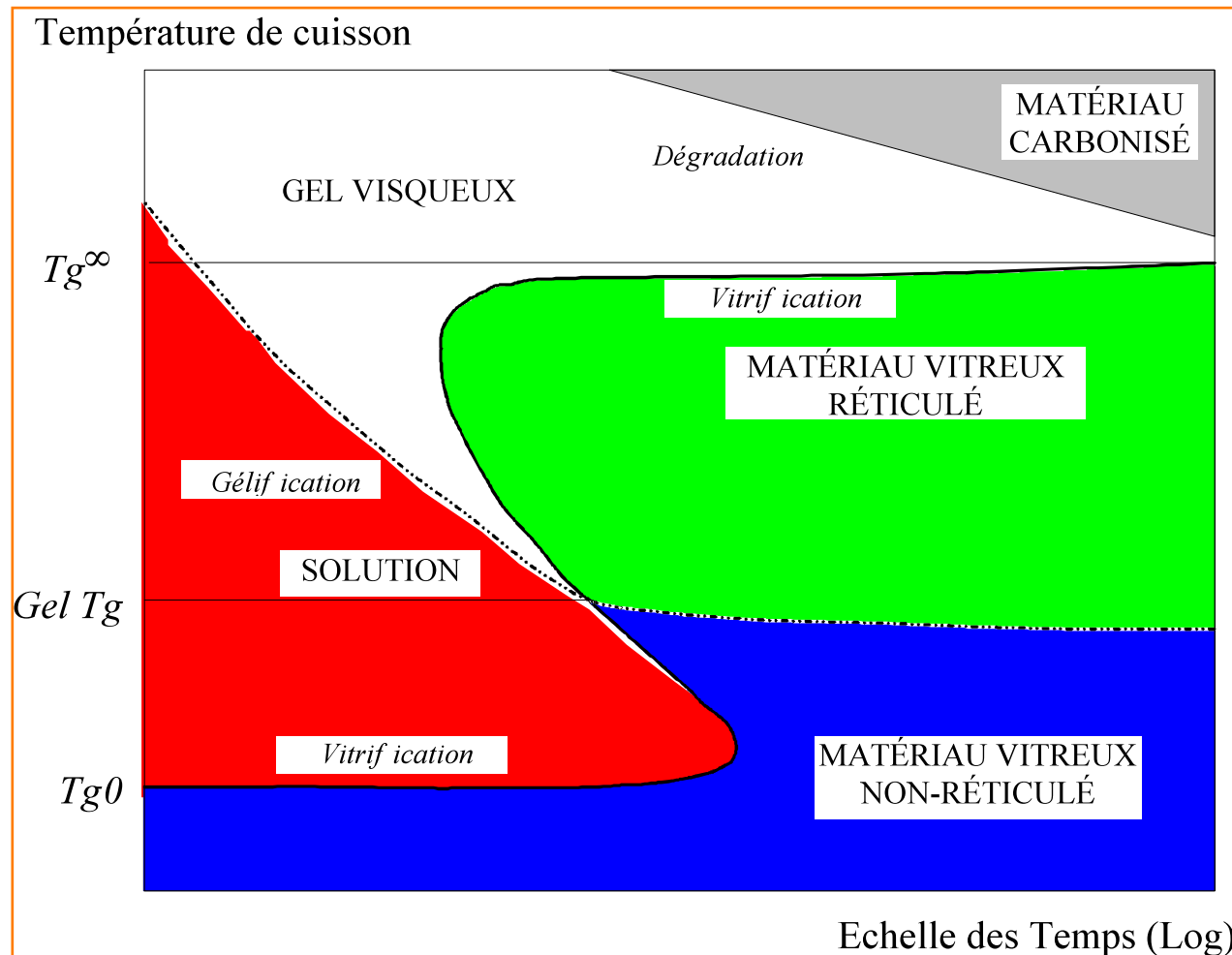
Changement du modèle  
ou paramètres  
du modèle rhéologique



**B**

## B.9 Identification des changements de phase : rhéologie

### B.9.1 Diagrammes TTT

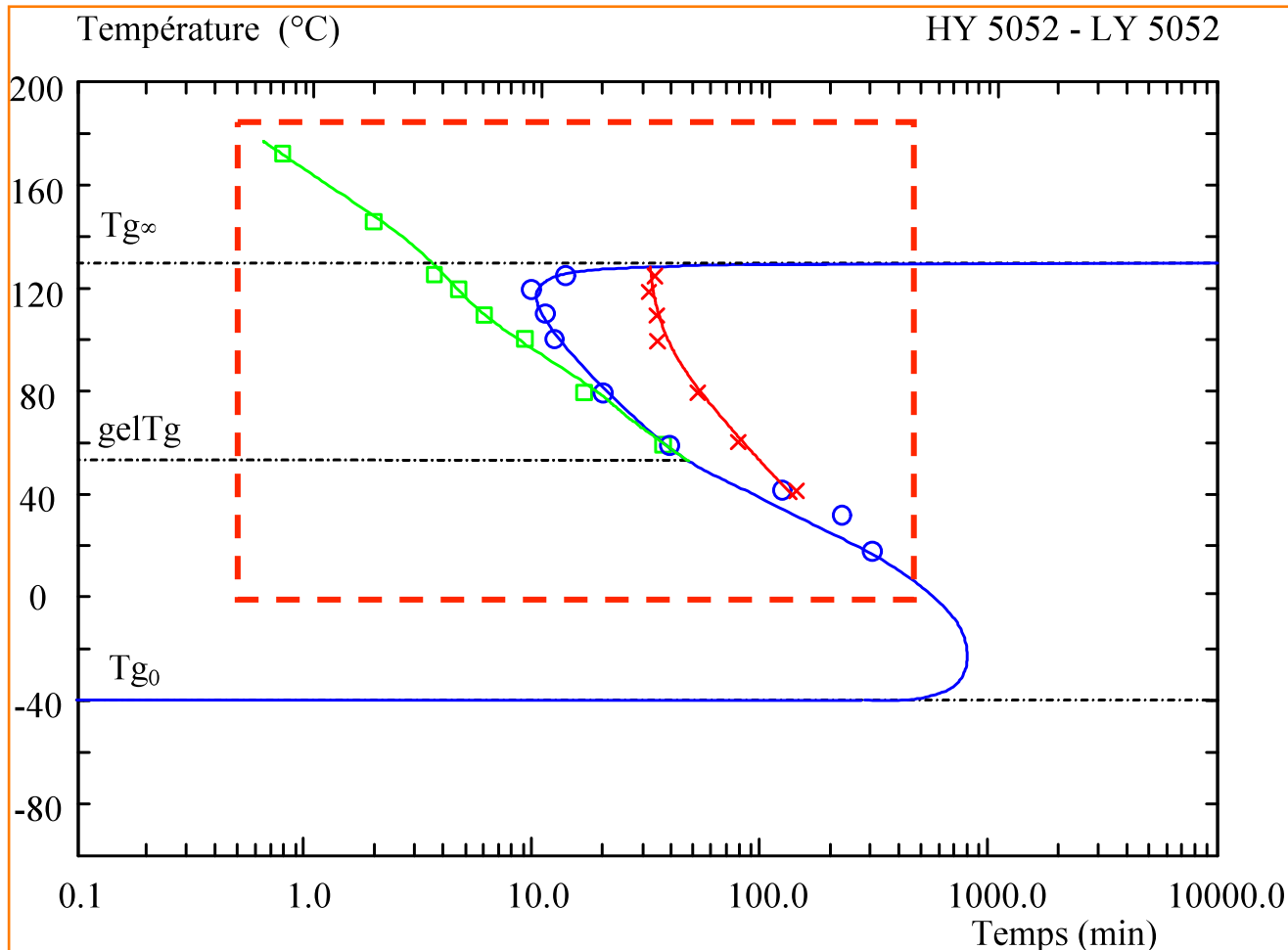




**B**

## B.9 Identification des changements de phase : rhéologie

### B.9.1 Résultats expérimentaux



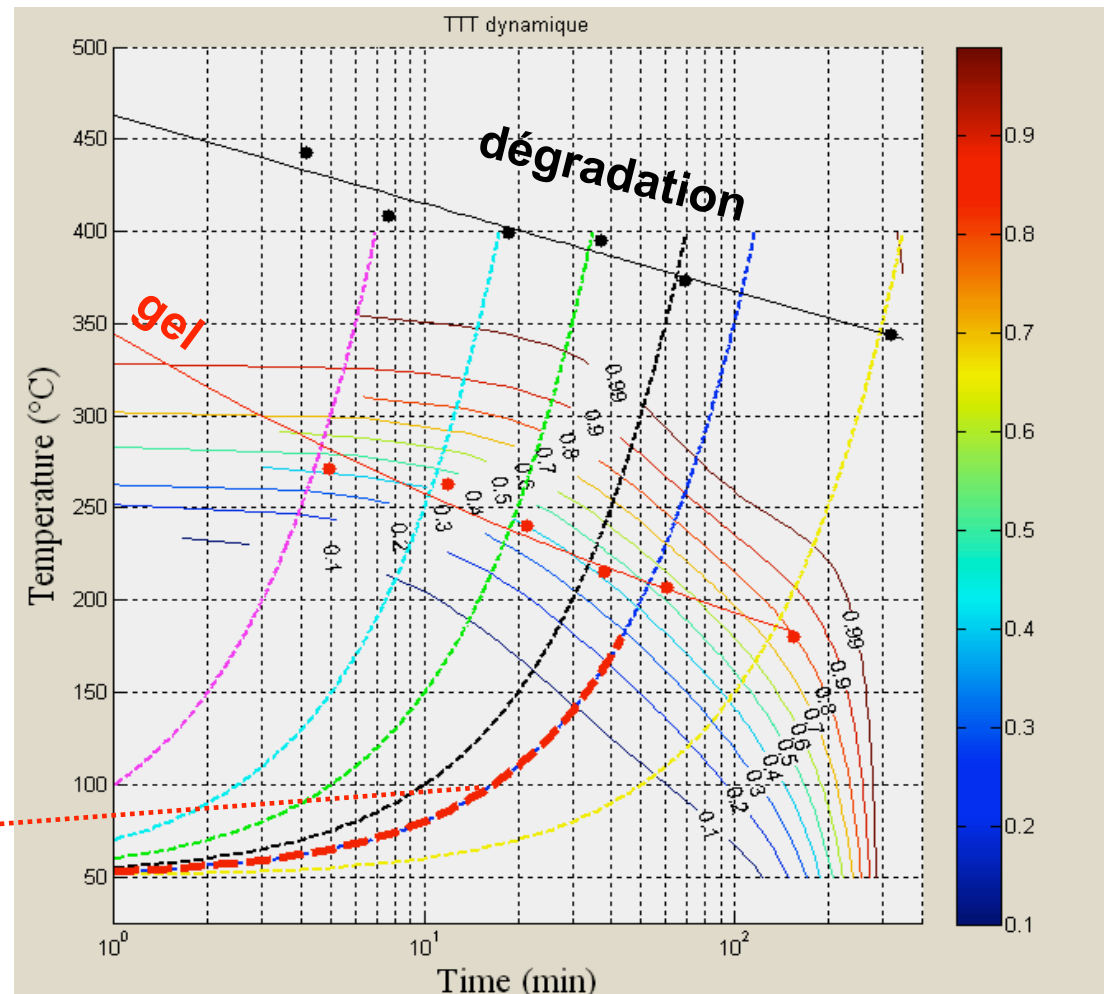
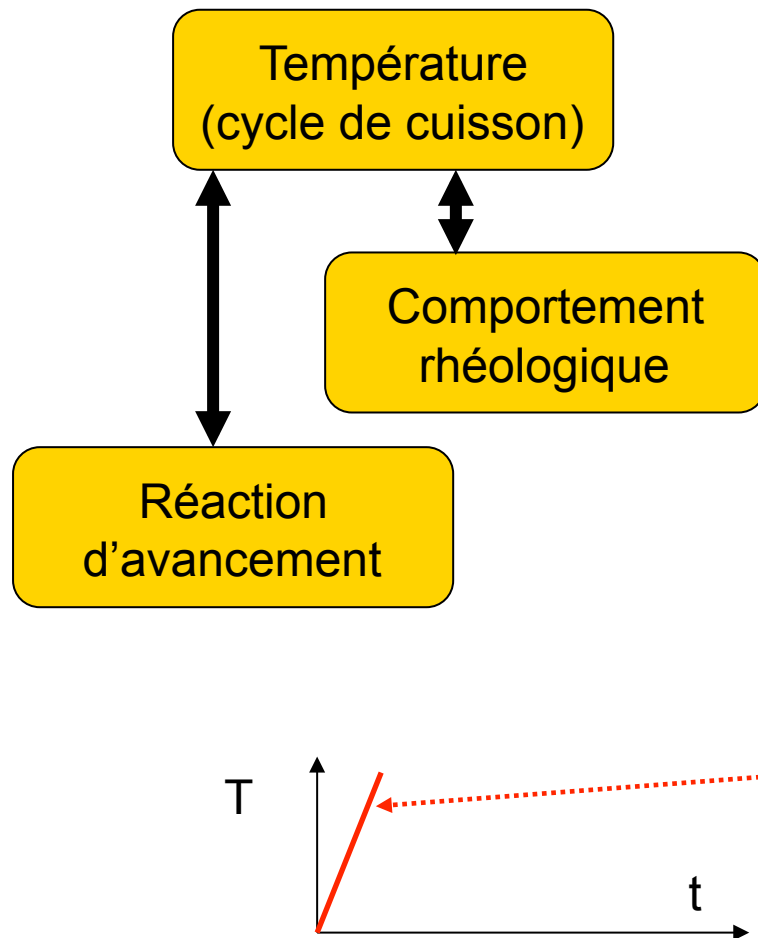




**B**

## B.9 Identification des changements de phase : rhéologie

### B.9.1 Résultats expérimentaux

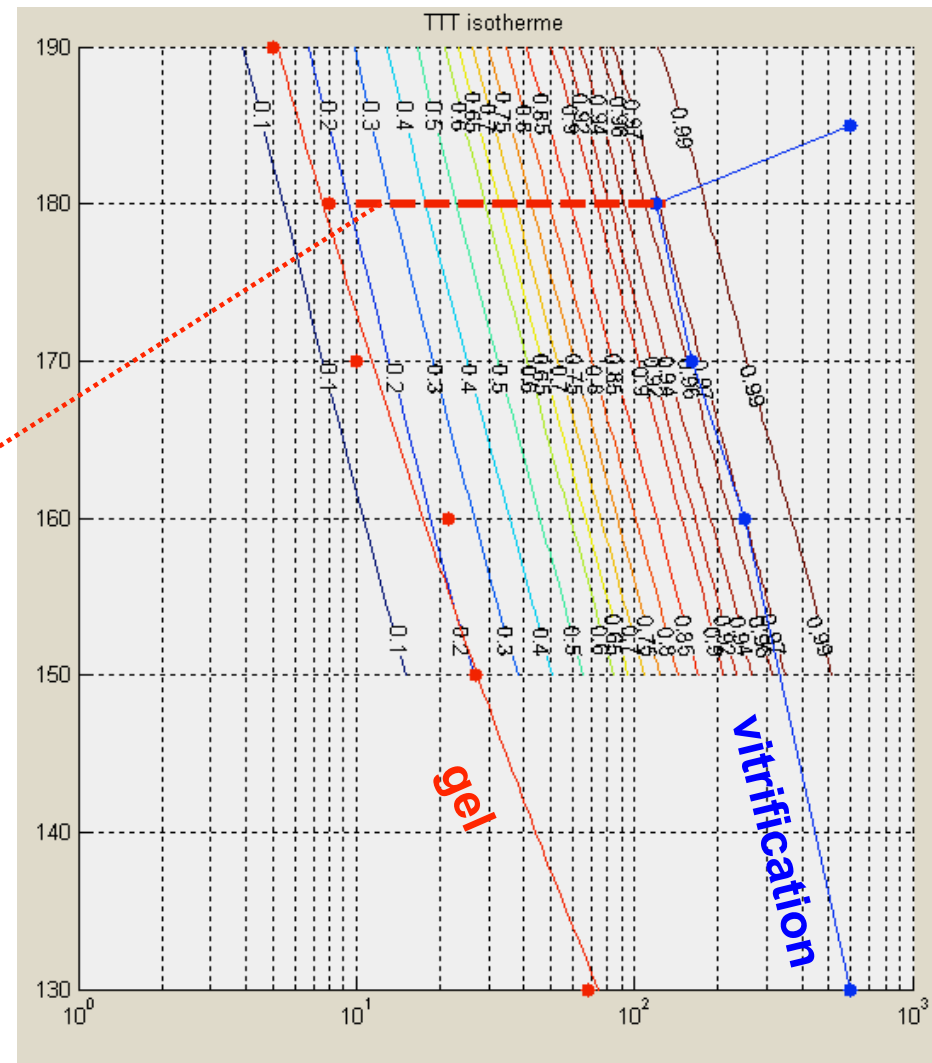
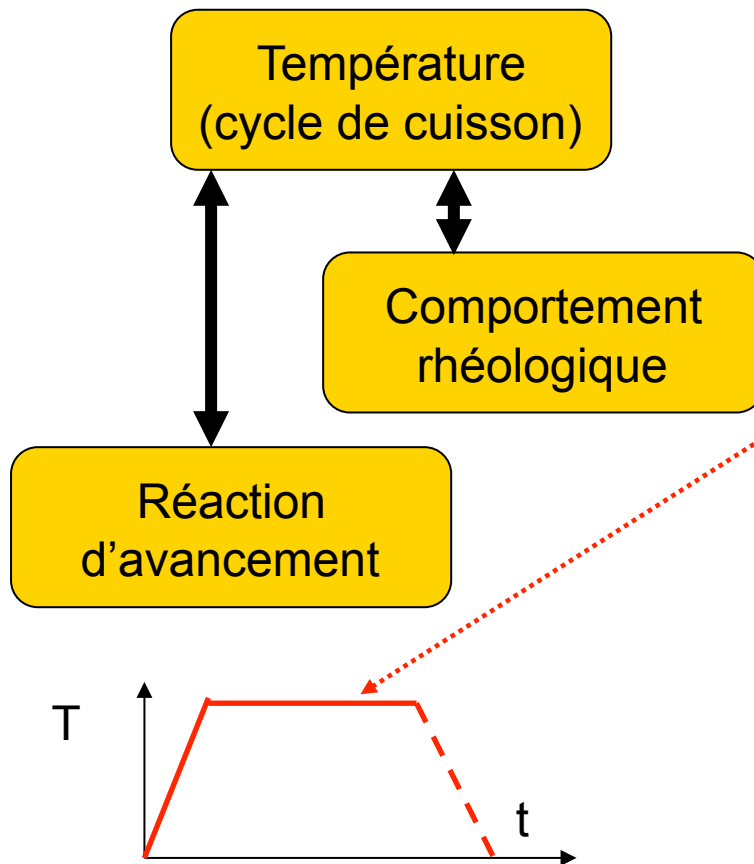




**B**

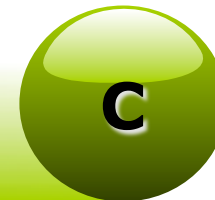
## B.9 Identification des changements de phase : rhéologie

### B.9.1 Résultats expérimentaux





Quelques procédés de  
mise en oeuvre analyses

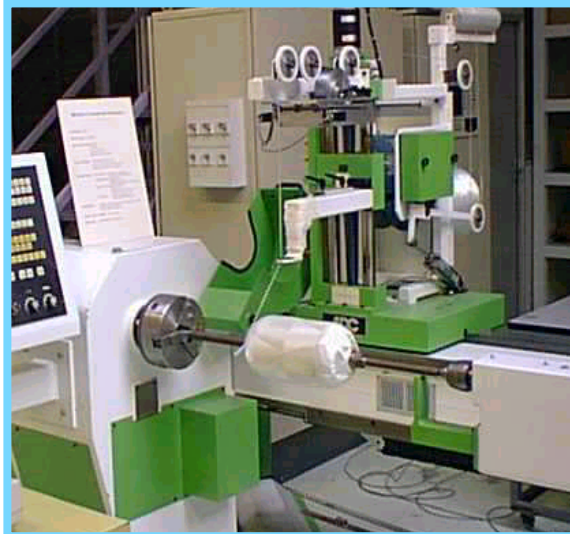




## C

### C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation

#### C.1.1 Enroulement : principes



*Machine enroulement ICA*

*∅ 600 mm – L 4 m*

*1 collecteur optique et 1 électrique  
tournants pour fibres RdB et TCP*

- Tension sur fil et vitesse enroulement
- Taux d'imprégnation (si roving sec)
- T° imprégnation

*UP, Epoxy, PEEK, ...*

- Matière mandrin
- Chauffage mandrin oui/non
- **Mouillabilité mèche (fil)**
- **Perméabilité fil**
- **Viscosité matrice**



C

## C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation

### C.1.2 Enroulement : polymérisation de la matrice

Polym. Etuve°

- Niveau de vide
- T°

Polym. Autoclave

- Niveau de vide
- Pression
- T°

Polym. sur  
machine  
Enroul.

- T°



**C**

## C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation

### C.1.3 Enroulement : trajectoires

- Trajectoire fil

Trajectoires géodésiques :

Plus court chemin d'un point à l'autre.

**Glissement nul.**

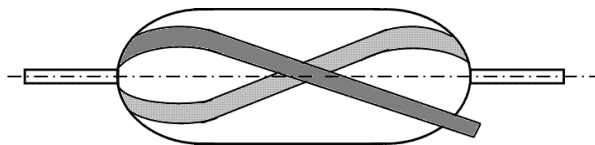
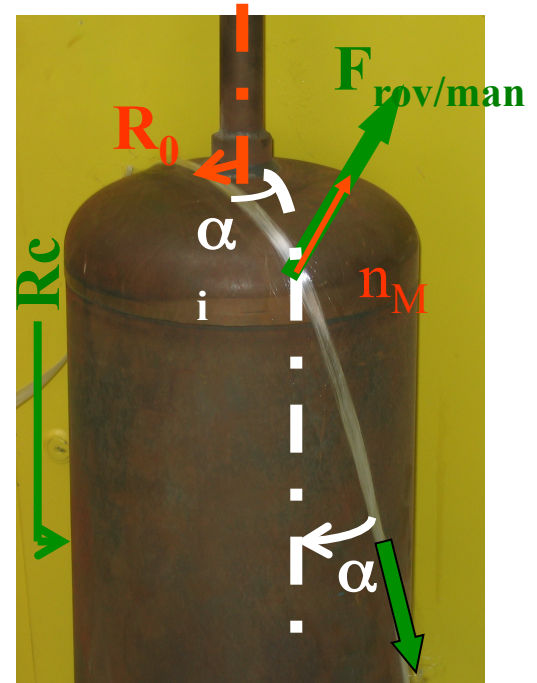
Effort du fil sur le mandrin toujours  $\perp$  surface  
mandrin ( $n \parallel F_{rov/man}$ )

Géodésique :  $R_i \cdot \sin(\alpha_i) = cte.$

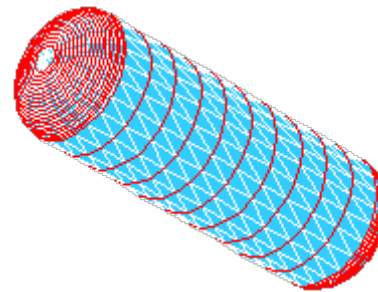
Exemple : pour  $R_c = 100 \text{ mm}$

$\alpha = 54^\circ \rightarrow R_0 = 83 \text{ mm}$  (ouverture polaire)

$\alpha = 23^\circ \rightarrow R_0 = 40 \text{ mm}$  ( $R_0 = R \sin(\alpha)$ )



Polaire



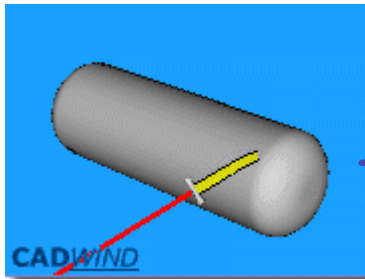


C

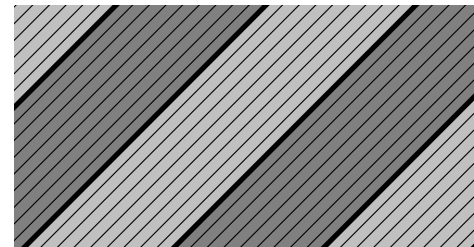
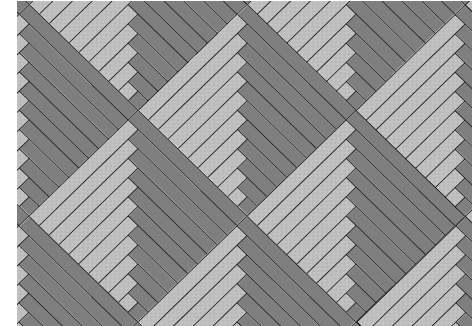
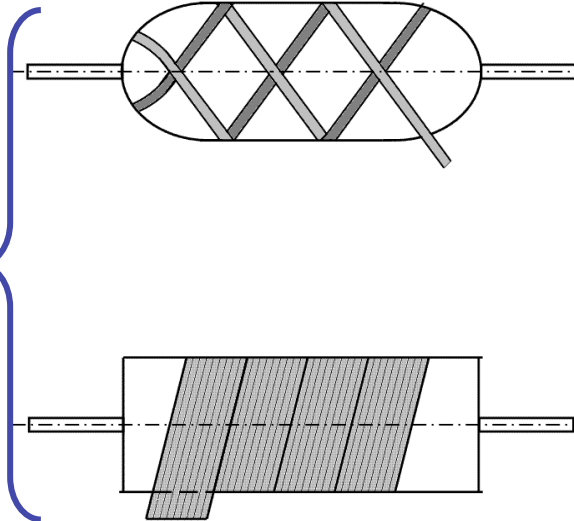
## C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation

### C.1.3 Enroulement : trajectoires

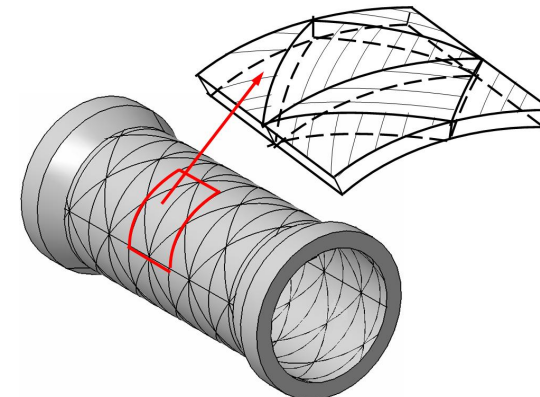
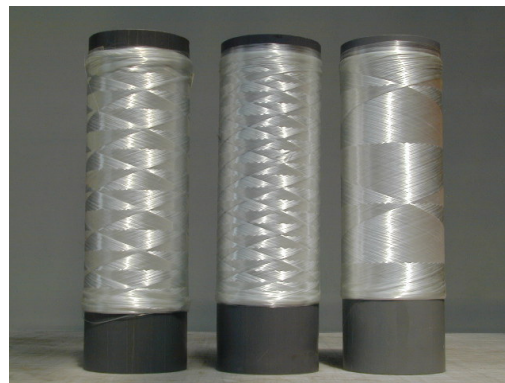
- Trajectoire fil



Hélicoïdal



- Pas d'enroulement
- Cellules formées





**C**

## C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation

### C.1.4 Enroulement : mécanique

Pour un enroulement  
géodésique

(enr-1 et 2)

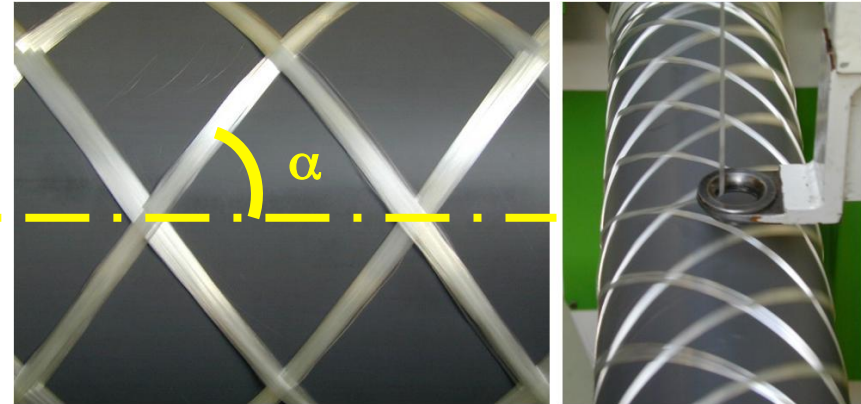
$$F_r + F_t = 0$$

$$F_t = -\Delta P_{res}$$

$F_r$  : effort radial mandrin / mèche imprégnée

$F_t$  : effort tension mèche

$\Delta P_{res}$  : gradient de pression dans la résine quand la mèche est sur le mandrin



A chaque enroulement la couche suivante exerce donc une pression sur la précédente  
Compactage des couches de fibres : temps  $t_f$  pour écoulement de résine à travers 1 pli  
(modèle de Cai, Gutowski)

$$t_f = t^* \cdot \left( \frac{4 \cdot k_z'' \cdot \mu \cdot h_0^2}{A_s \cdot r_d^2} \right)$$

(enr-3)

$k_z''$  Constante de Kozeny

$R_d$ , rayon de la fibre

$A_s$ , raideur d'une mèche de fibres

$t^*$ , constante de temps (auquel la pression chute brutalement)

$\mu$ , viscosité matrice

$h_0$ , épaisseur de la couche enroulée





C

**C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation**

**C.1.4 Enroulement : mécanique**

La pression  $p_0$  exercée par la couche de mèches (k+1) enroulée sur la couche de mèches k est :

$$p_0 = \frac{F_t^{k+1} \cdot \sin^2 \alpha}{r_f^{k+1} \cdot w^{k+1}} \quad (\text{enr-4})$$

avec :  $F_t$ , tension de la mèche,  
a, angle d'enroulement,  
w, largeur de la mèche  
 $r_f$ , rayon de l'axe du tube au plan moyen du pli k+1

Au fur et à mesure de l'enroulement cette pression varie comme des série de n accroissements

$$p_0 = n \cdot \Delta p_0^{k+1} \quad (\text{enr-5})$$

Le déplacement radial de la  $j^{\text{ème}}$  couche de mèches de fibres :

$$\left. \begin{aligned} u_{rr} &= a_1^j \cdot r^{(\lambda)j} + b_1^j \cdot r^{(-\lambda)j} + c_1^j \cdot \left[ \frac{C_{26} - 2C_{36}}{4 \cdot C_{33} - C_{22}} \right]^j \cdot r^2 + d_1^j \cdot \left[ \frac{C_{12} - 2C_{13}}{C_{33} - C_{22}} \right]^j \cdot r \\ u_{rr} &= a_1^j \cdot r^{(\lambda)j} + \frac{b_1^j}{r} + c_1^j \cdot \left[ \frac{C_{26} - 2C_{36}}{4 \cdot C_{33} - C_{22}} \right]^j \cdot r^2 + d_1^j \cdot \left[ \frac{C_{12} - 2C_{13}}{C_{33} - C_{22}} \right]^j \cdot r \cdot \ln(r) \end{aligned} \right\} (\text{enr-6})$$



C

**C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation**

**C.1.4 Enroulement : mécanique**

Dans les équations (enr-6) :

$a_i$ ,  $b_i$  et  $c_i$  sont des constantes à évaluer à partir de la continuité des déplacements aux interfaces entre les couches de mèches

$$\lambda_j^2 = \frac{C_{22}^j}{C_{33}^j} \quad (\text{enr-7})$$

$$\{C_{11} = E_{11} \cdot (1 - \nu_{23}\nu_{32}) / \Psi$$

$$\{C_{22} = E_{22} \cdot (1 - \nu_{31}\nu_{13}) / \Psi$$

$$\{C_{33} = E_{33} \cdot (1 - \nu_{12}\nu_{21}) / \Psi$$

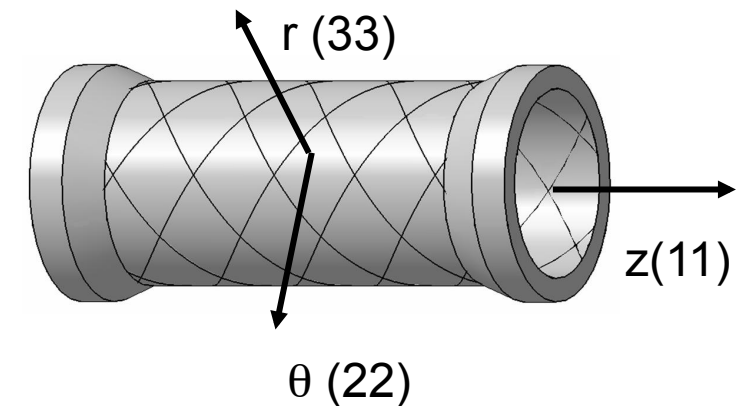
$$\{C_{12} = (\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23})E_{11} / \Psi = (\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13})E_{22} / \Psi$$

$$\{C_{13} = (\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32})E_{11} / \Psi = (\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23})E_{33} / \Psi$$

$$\{C_{23} = (\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31})E_{22} / \Psi = (\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13})E_{22} / \Psi$$

et

$$\Psi = 1 - (\nu_{12}\nu_{21}) - (\nu_{23}\nu_{32}) - (\nu_{31}\nu_{13}) - 2 \cdot (\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13})$$



(enr-8)

E, G et  $\nu$  : modules et coef. Poisson



**C**

**C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation**

**C.1.4 Enroulement : comportement matériau**

Rigidité non linéaire : relation entre la rigidité d'une couche de mèches de fibres (noté cf) et la fraction volumique de fibres

$$E_{xx}^{cf} = V_f \cdot E_f \cdot \frac{\pi / 4}{V_a} \quad (\text{enr-9})$$

$$E_{yy}^{cf} = E_{zz}^{cf} = \frac{\frac{\sqrt{V_a}}{\sqrt{V_f}} \cdot \left[ 5 - \frac{\sqrt{V_f}}{\sqrt{V_a}} - 4 \cdot \frac{\sqrt{V_0}}{\sqrt{V_f}} \right]}{\frac{\beta^4}{3 \cdot \pi \cdot E_f} \cdot \left[ \frac{\sqrt{V_a}}{\sqrt{V_f}} - 1 \right]^5} \quad (\text{enr-10})$$

$V_0$ ,  $V_a$  et  $\beta$ , constantes fonction de l'état de la couche de fibres  
 $E_f$ , module des fibres

$E_{xx}^{cf}$  Rigidité sens fibres

$E_{yy}^{cf} = E_{zz}^{cf}$  Rigidités transverse et hors plan

Le paramètre  $V_a$ , représente la facilité d'alignement des fibres  
 $V_a$  est couplé avec la vitesse d'enroulement



C

**C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation**

**C.1.4 Enroulement : comportement matériau**

Couplage rigidité non linéaire / rhéologie de la matrice TD / d° d'avancement

Avant la fin de la gélification les rigidités sont considérées :

$$\left. \begin{aligned} \mu &\leq \mu_{gel} \\ E_{xx} &= E_{xx}^{cf} \\ E_{yy} &= E_{zz} = E_{yy}^{cf} = E_{zz}^{cf} \end{aligned} \right\} \text{(enr-11)}$$

Après la fin de la gélification les rigidités sont considérées :

$$\left. \begin{aligned} \mu &> \mu_{gel} \\ E_{xx} &= E_{xx}^{cf} + E_m \cdot V_m \\ E_{yy} &= \left( \frac{1}{E_{yy}^{cf}} + \frac{V_m}{E_m} \right)^{-1} \\ E_{zz} &= \left( \frac{1}{E_{zz}^{cf}} + \frac{V_m}{E_m} \right)^{-1} \end{aligned} \right\} \text{(enr-12)}$$

Hypothèse : quand  $\mu > \mu_{gel}$  : plus de mouvement de fibre



C

**C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation**

**C.1.5 Enroulement : écoulements de résine dans mèches en tension**

Hypothèse : quand  $\mu > \mu_{gel}$  : plus de mouvement de fibre

$$V_{rr} = \frac{K_z}{\mu} \cdot \frac{\Delta P_{res}}{h_f} \quad \text{(enr-13)}$$

$V_{rr}$  : vitesse de la mèche de fibres  
 $K_z$  : perméabilité de la mèche  
 $m$  : viscosité résine  
 $h_f$  : épaisseur de la mèche

Dès que une couche de mèches de fibres est passée à travers une région riche en résine, la couche se compacte et l'opposition du réseau de fibres à l'écoulement augmente → diminution de perméabilité

$$K_{zz} = \frac{\left(\frac{\phi_f}{2}\right)^2}{4 \cdot k_{zz}} \cdot \frac{\left[\sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1\right]^3}{\left[\frac{V_a}{V_f} + 1\right]} \quad \text{(enr-14)}$$

Déplacement des fibres

$$du_{mf} = -\frac{K_{zz}}{\mu} \cdot \frac{\sigma_f \cdot \sin^2 \alpha}{r_f} \cdot dt \quad \text{(enr-15)}$$

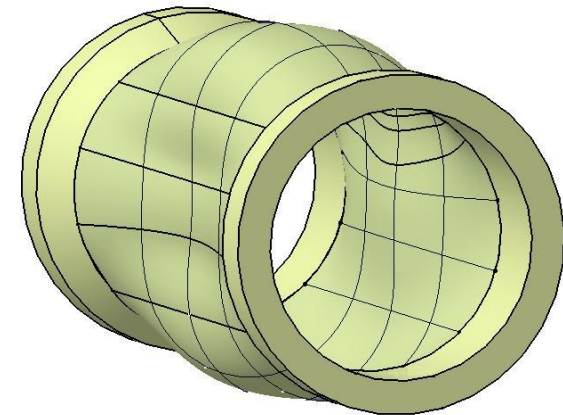
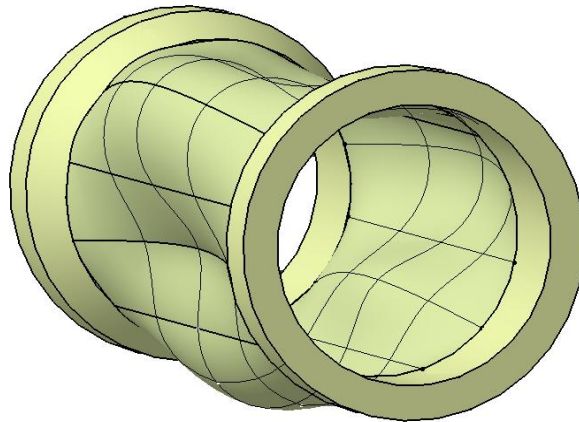
$r_f$ , rayon de l'axe du tube au plan moyen du pli k+1



C

## C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation

### C.1.6 Enroulement : comportements / motifs





**C**

## C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation

### C.1.7 Enroulement : plan d'expérience et couplages

Tube +/- 55°

Grandeur mesurée	Type de drapage		Tension d'enroulement		Gradient de tension d'enroulement		Durée de l'enroulement	
	Type 1	Type 2	Faible	Forte	Fort	Faible	Courte	Longue
Pression éclatement (MPa)	20,8	20,5	20,9	20,4	20,7	20,5	Pas d'effets	
Module circonférenciel (MPa)	Pas d'effets		55900	59200	Pas d'effets		59300	56100
Effort de rupture en cisaillement (N)	5370	7120	Pas d'effets		Pas d'effets		Pas d'effets	
Moment résiduel (cm.N)	-60,1	-3,2	Pas d'effets		-7,2	+0,8		
V <sub>f</sub> moyen (%)	56,3	53,7	53,2	56,8	Pas d'effets		56,1	53,9
V <sub>p</sub> (%) (taux de porosité)	Pas d'effets		2,9	2,3	Pas d'effets		Pas d'effets	
Ø externe tube (mm)	Pas d'effets		529,66	528,55	Pas d'effets		Pas d'effets	
Epaisseur paroi tube (mm)	Pas d'effets		6,43	6,04	Pas d'effets		6,04	6,45

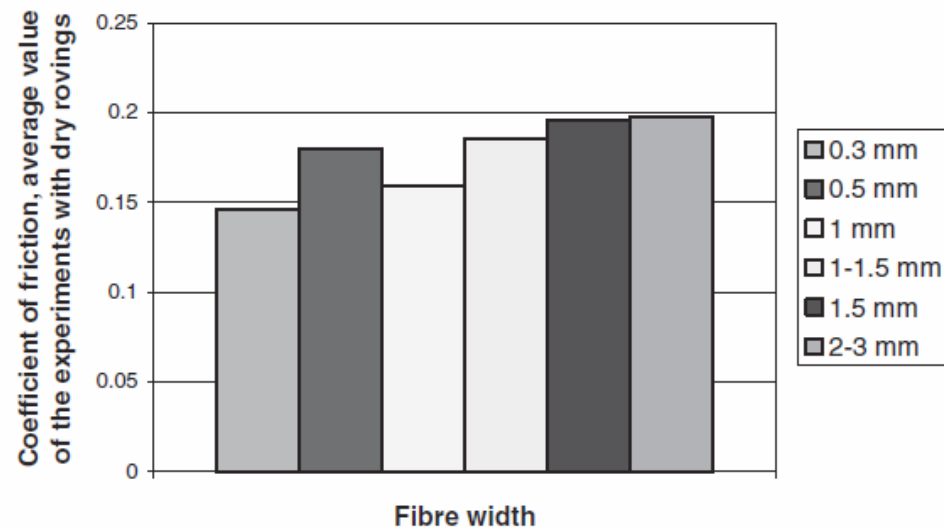
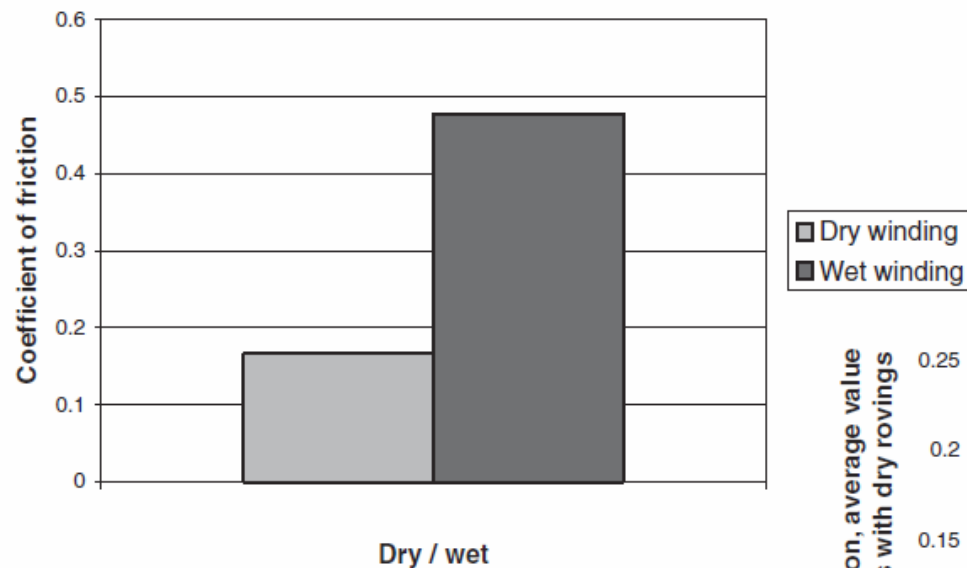


**C**

## C.1 Procédés : Enroulement. Paramètres, simulation

### C.1.8 Enroulement : trajectoires non géodésiques

Pour les cas en trajectoires non géodésiques







C

## C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

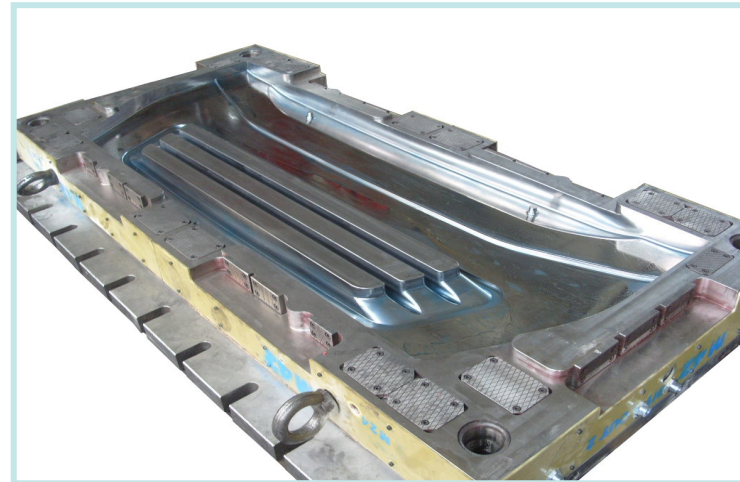
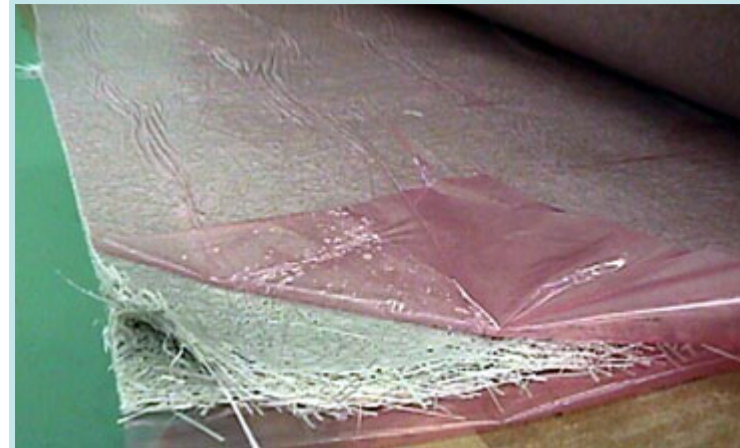
### C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)

#### a) Principe Compression SMC



*UP, EP, Phénoliques,  
Mélamines*

- T°, HR, atelier
- Pression
- T° moule  
(préchauffage et cycle)
- Vitesse de fermeture presse (mm/min)
- durée stockage SMC
- réaction en T°



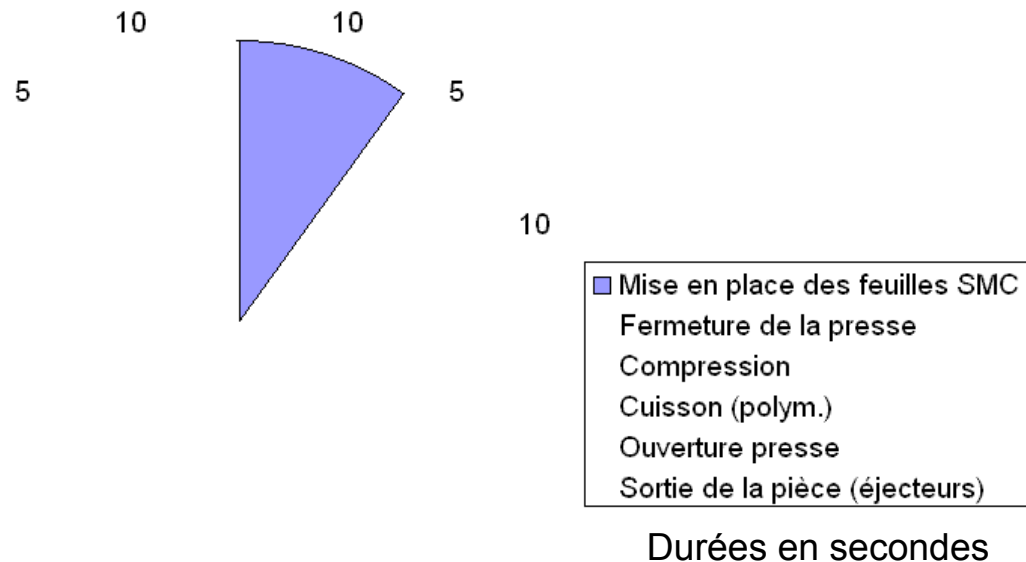


## C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

### C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)

#### a) Principe Compression SMC : RAPIDITE

SMC durée des cycles de production



La polymérisation intervient pendant et après la mise en forme (qui se fait en T°)

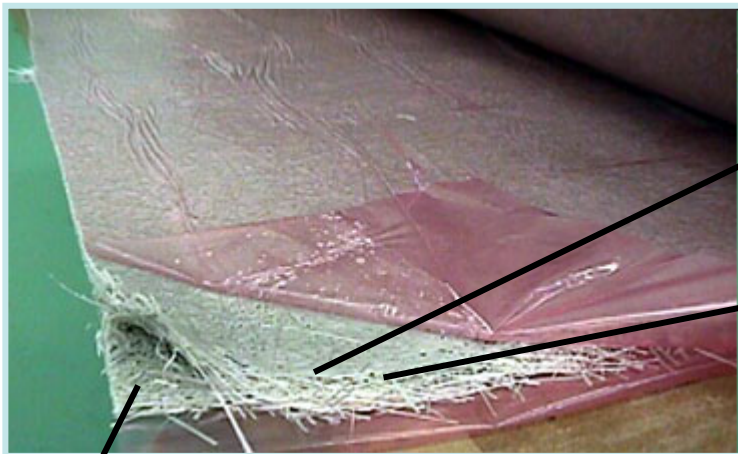


## C

### C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

#### C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)

##### b) Matériau : représentation continue ?



Systeme UP  
Ecoulement très rapide (quelques  
Secondes) → pas de réaction de  
réticulation

La structure fibreuse dans l'épaisseur  
affecte la réponse mécanique pendant  
l'écoulement (compression +  $T^\circ$ )

Matériau très hétérogène : échelle d'étude  
Mécanique > taille hétérogénéités



Mais si échelle étude >  
taille hétérogénéité alors matériau isotrope  
transverse



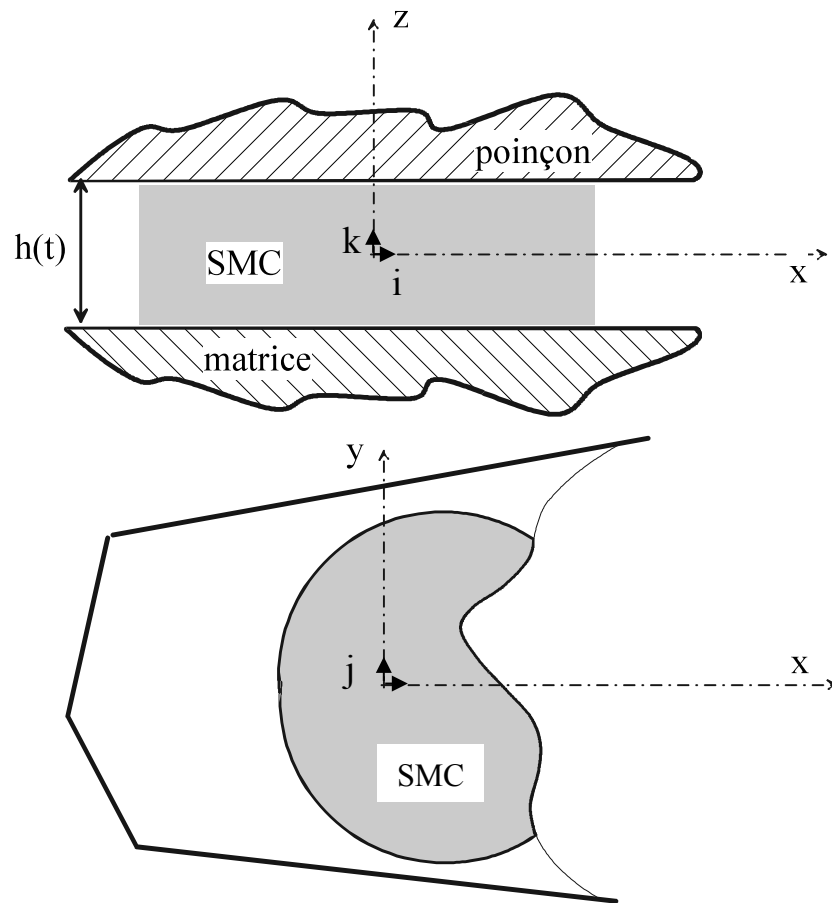
Fibres et matrice : mêmes vitesses



**C**

## C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

### C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)



#### c) Problèmes

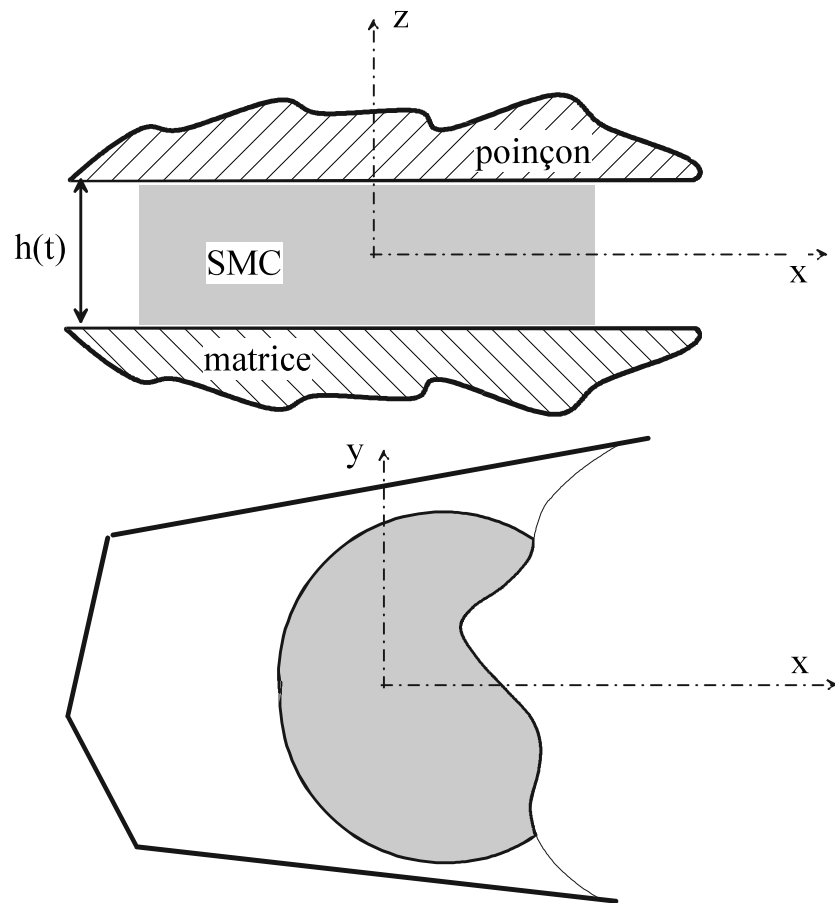
- Comportement rhéologique matrice+fibres courtes (50 mm) : quelle loi ?
- Réorientation de groupes de fibres ?
- Ségrégation fibres / matrice (pièces complexe avec nervures)
- Cisaillement du matériau dans l'épaisseur de la pièce
- Élongation du matériau
- Question : connaître les paramètres locaux (contraintes, vitesses,.. ) → importance loi comportement rhéologique



**C**

## C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

### C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)

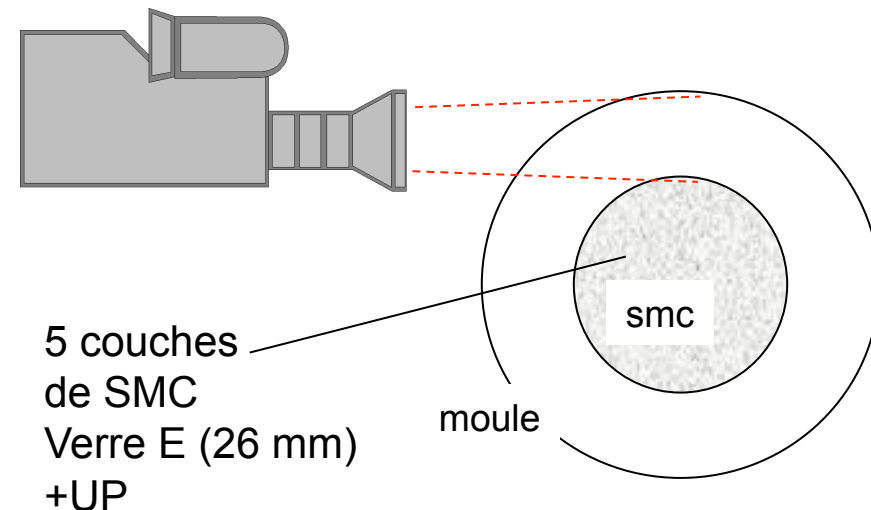


#### c) Problèmes

- Comment considérer le composite ?
- 1 seule couche pour toute l'épaisseur
  - multicouches ?

#### d) Constatations expérimentales

(P.T. Odenberger, 2004)



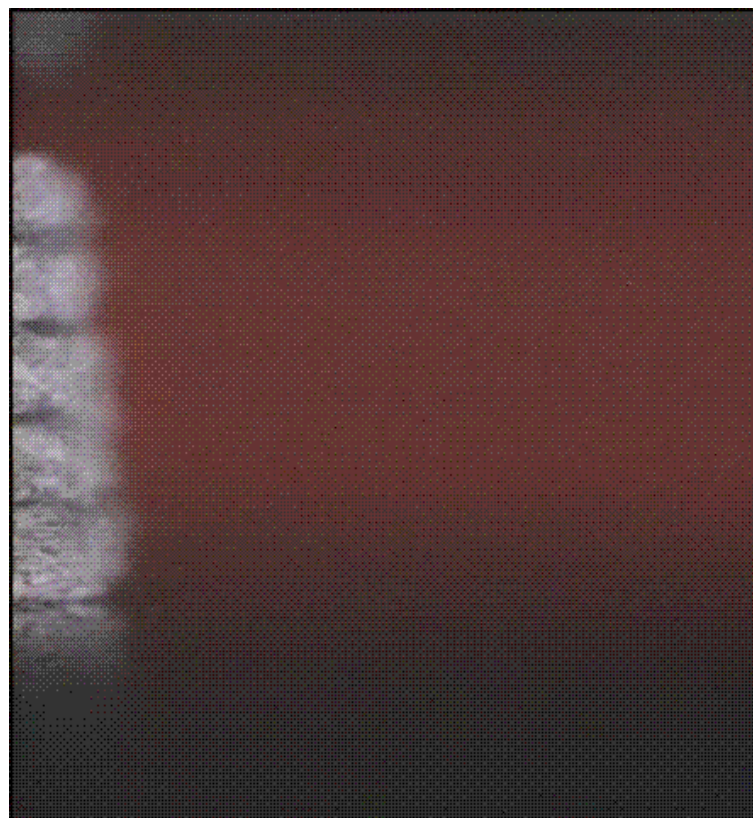


C

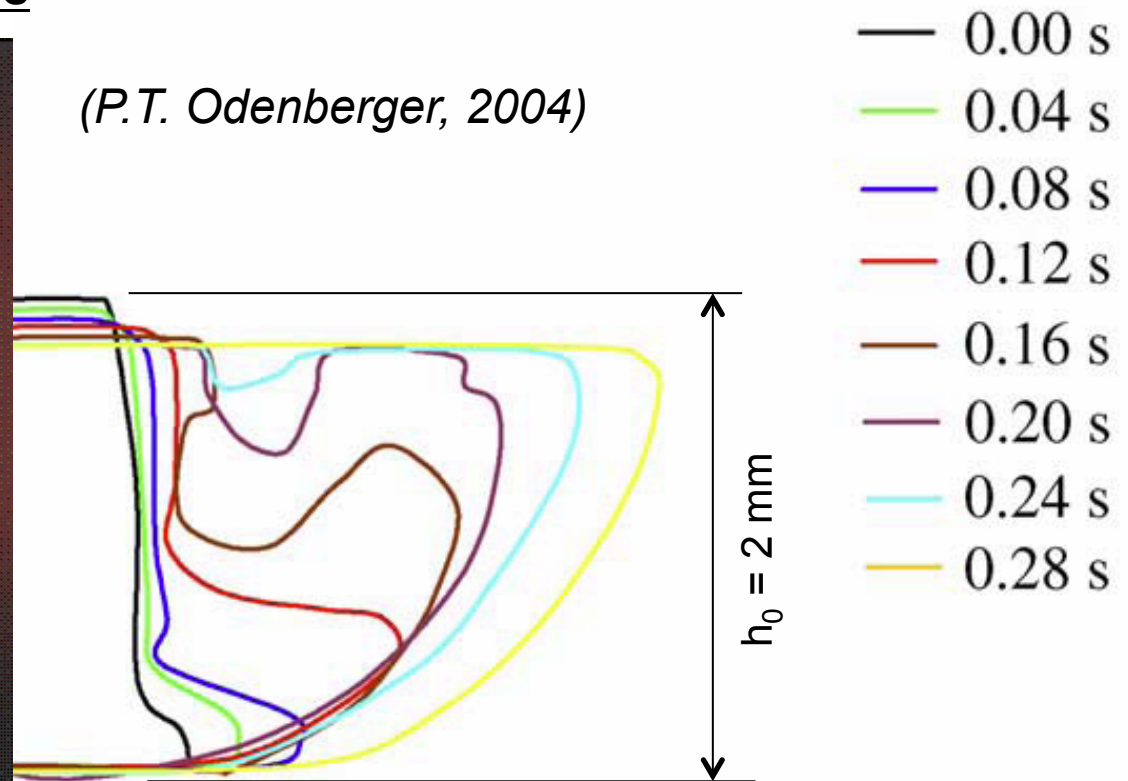
**C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation**

**C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)**

**d) Constatations expérimentales**



(P.T. Odenberger, 2004)



Vitesse compression 15 mm/s – poinçon et matrice à 135°C

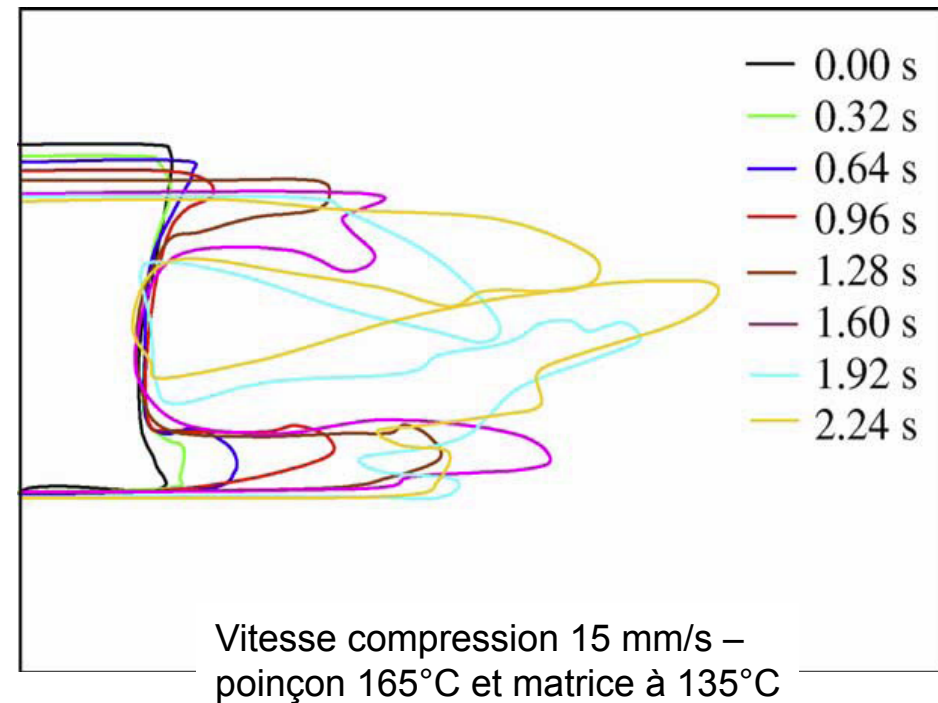
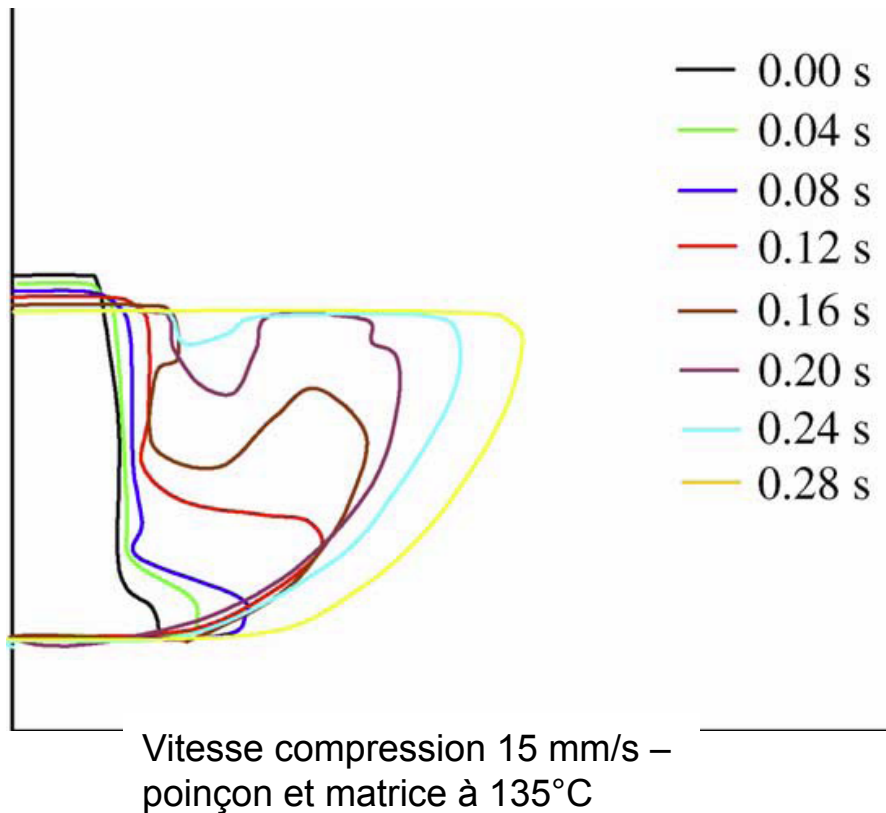


C

**C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation**

**C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)**

**d) Constatations expérimentales (P.T. Odenberger, 2004)**



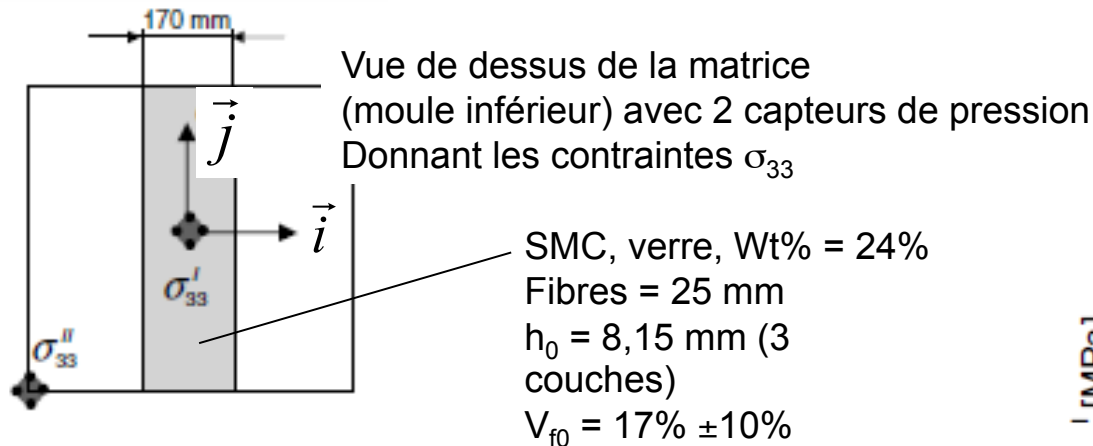


C

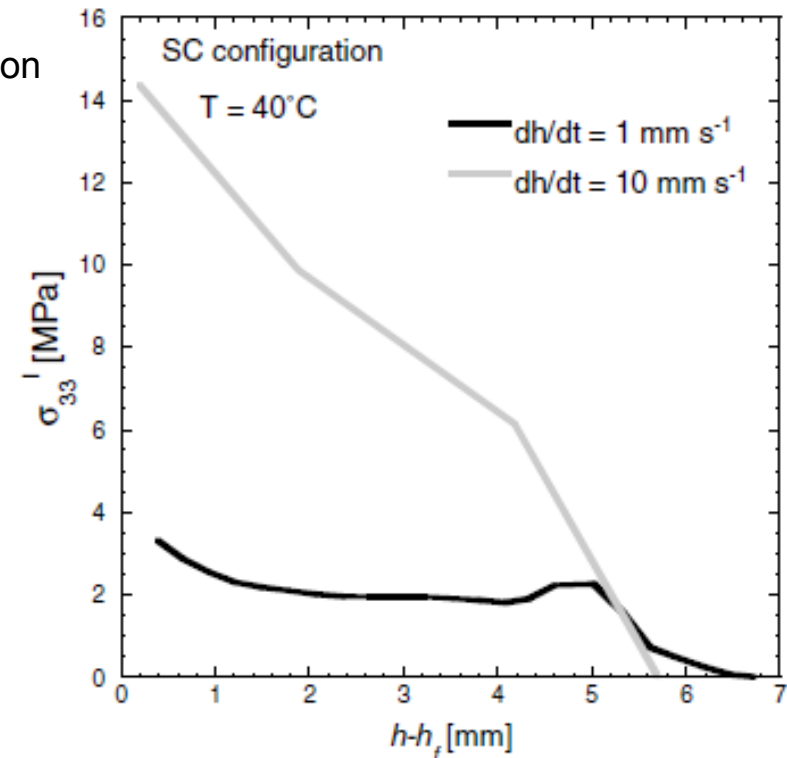
**C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation**

**C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)**

**d) Constatations expérimentales (P. Dumont, 2007)**



Influence vitesse de fermeture



(épaisseur courante – épaisseur finale)



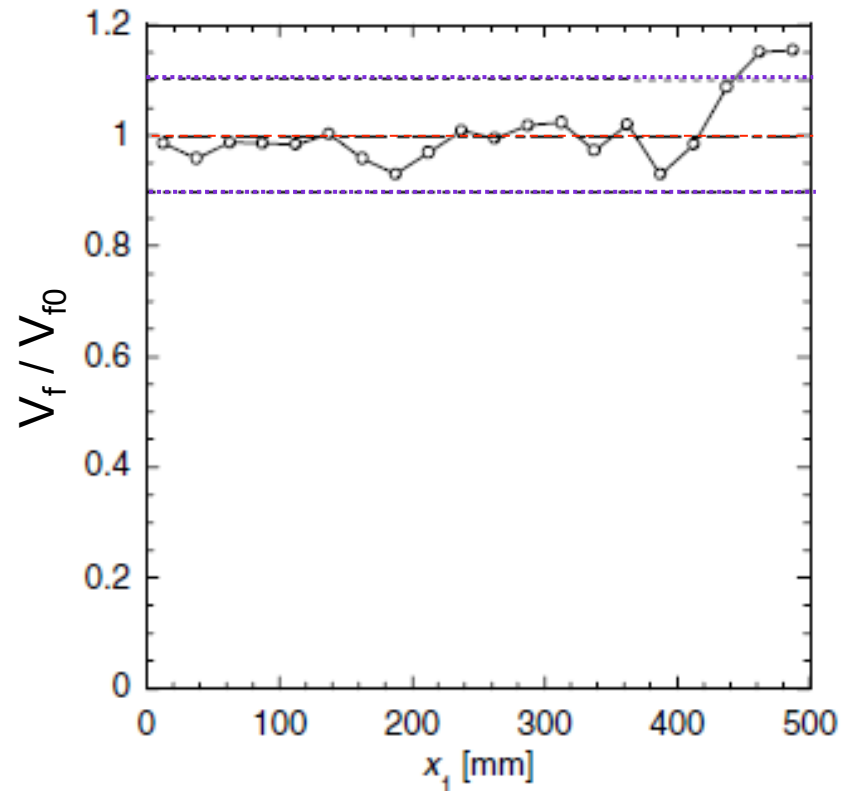
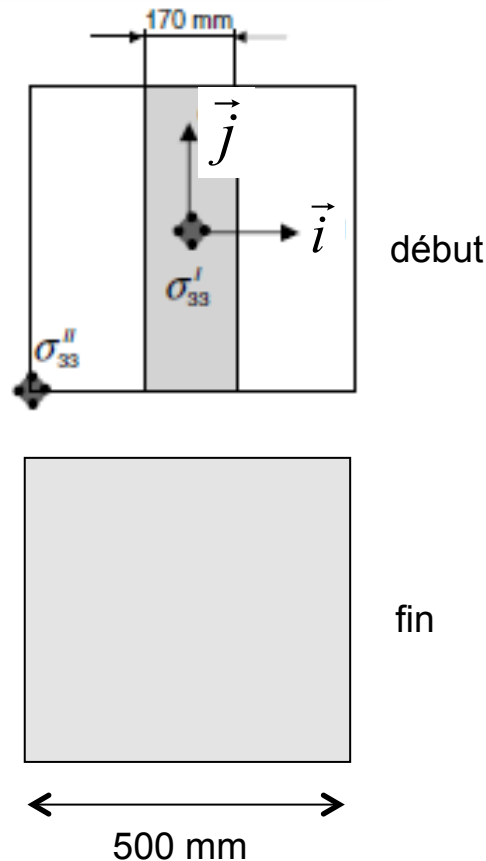


C

**C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation**

**C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)**

**d) Constatations expérimentales (P. Dumont, 2007)**



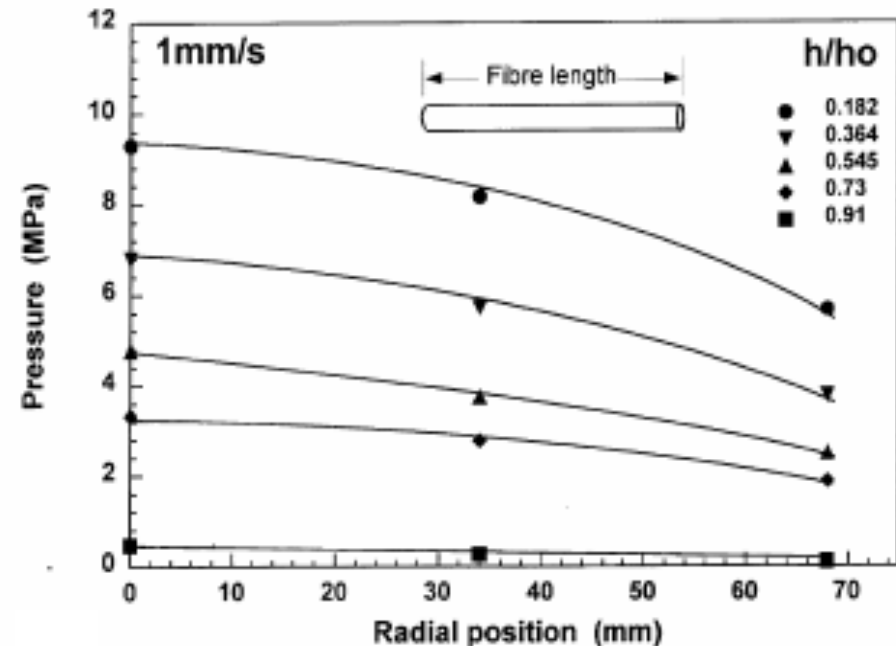
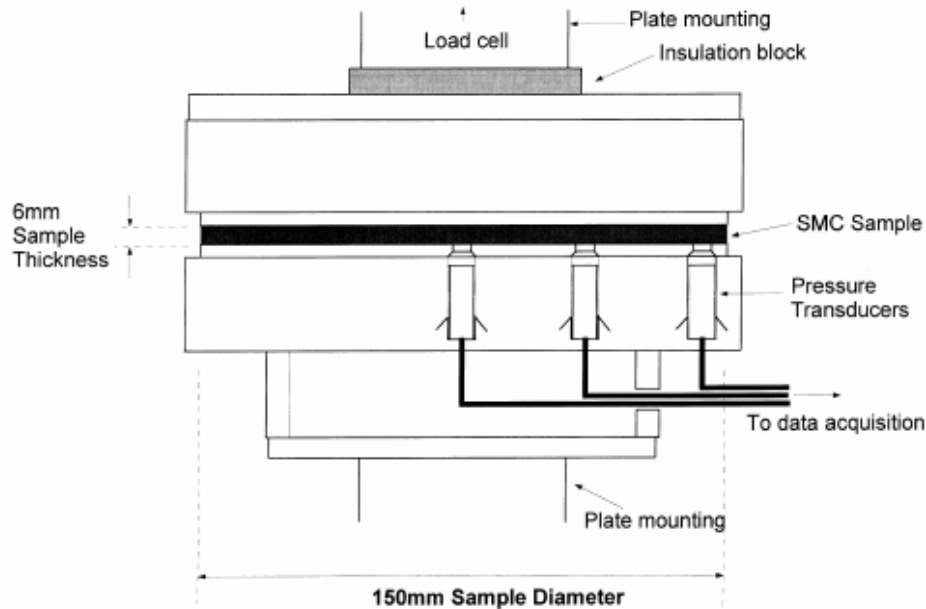


C

## C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

### C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)

#### d) Constatations expérimentales (G. Kotsikos, 1998)





## C

### C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

#### C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)

d) Constatation expérimentales (*P.T. Odenberger, 2004*) (*P. Dumont, 2007*)  
(*G. Kotsikos, 1998*)

Bilan :

- 1°) écrasement, écoulement très complexe  
les couches inférieures en contact avec le moule se déforment sous les effets de la pression et en fonction de la T°
- 2°) « plug-flow » écoulement type élongationnel
- 3°) après écoulements, réaction du système UP → bulles gaz et porosités
- 4°) influence de la vitesse de fermeture sur contrainte axiale  $\sigma_{33}$
- 5°) les couches en contact avec le moule subissent les + grandes déformations
- 6°) ségrégation des fibres ? Négligeable face à la variabilité initiale du Vf(%) matériau

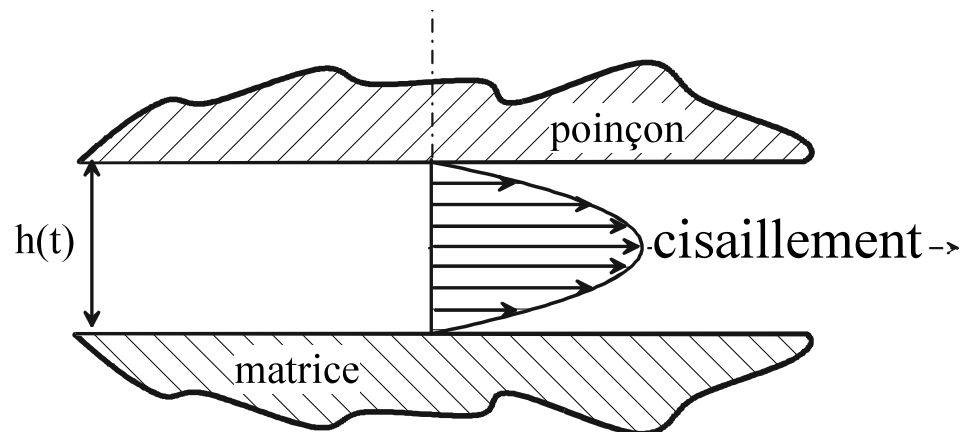


C

## C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

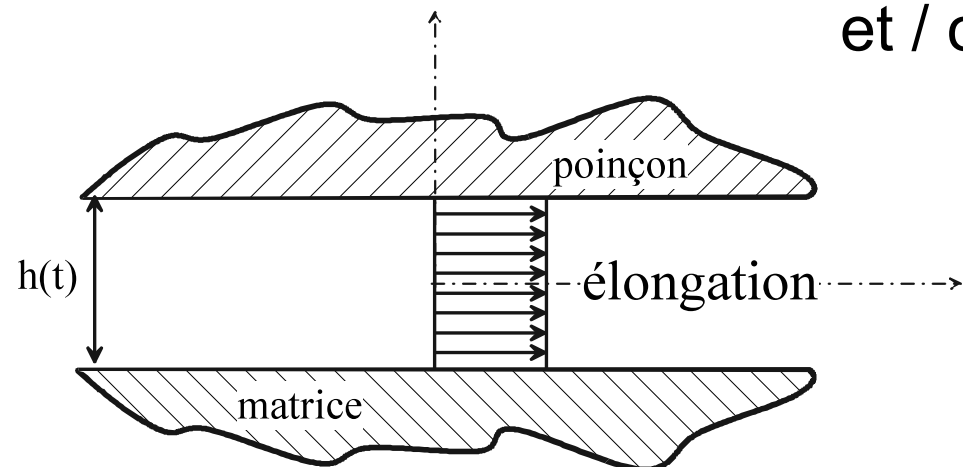
### C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)

#### e) Modélisation possible



Loi : Rhéomètre plateaux //

et / ou ?



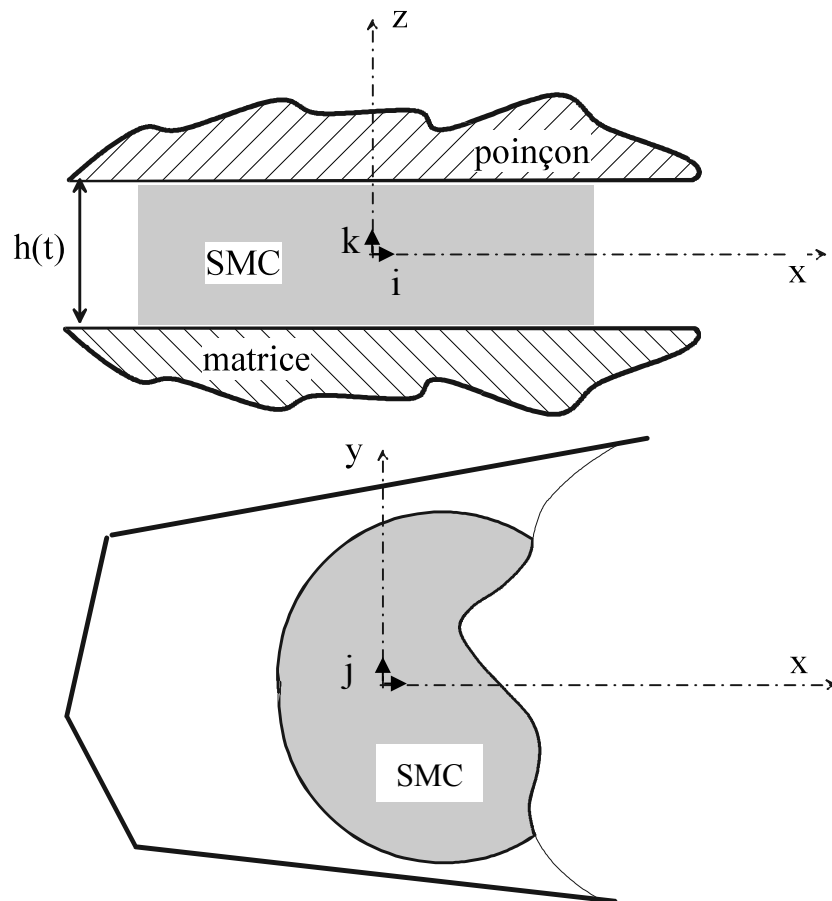
Loi : Rhéomètre élongationnel



C

C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)



f) Mécanique

- Hypothèses : ♦ SMC Incompressible  
♦ SMC purement visqueux

*Départ : analogie avec injection d'un TP fondu dans un moule*

$$\text{div} \vec{V} = 0 \quad (\text{inj-1})$$

$$\text{div}(\vec{\sigma}) = \vec{0} \quad (\text{inj-2})$$

$$\vec{\sigma} = -p \cdot \vec{I} + 2 \cdot \eta(T, \dot{\gamma}) \cdot \dot{\vec{\epsilon}} \quad (\text{inj-3})$$

$$\rho \cdot C \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \overrightarrow{\text{grad}T} \right) = \text{div}(\vec{k} \cdot \overrightarrow{\text{grad}T}) + \dot{W} \quad (\text{inj-4})$$

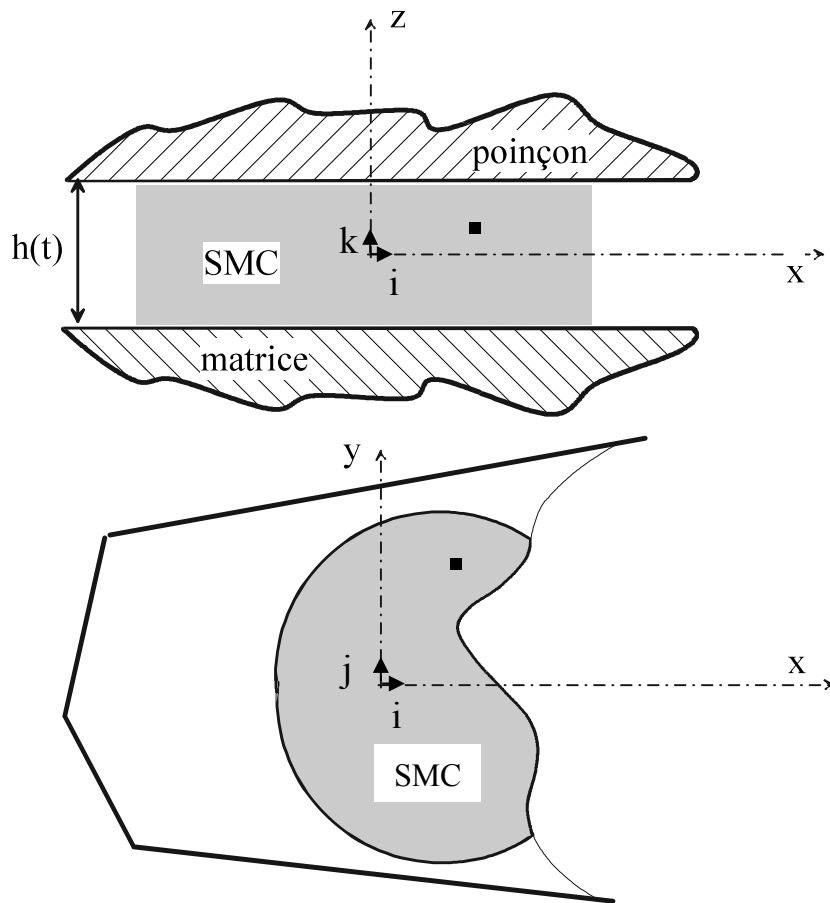
10 équations, 10 inconnues : vecteur vitesse, Tenseur des contraintes, pression, température



C

C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)



f) Mécanique

Hypothèses : ♦ SMC Incompressible  
♦ SMC purement visqueux

$$\begin{cases} \text{div} \vec{V} = 0 & (\text{smc-1}) \\ \text{div}(\bar{\sigma}) = \vec{0} & (\text{smc-2}) \\ \bar{\sigma} = -p \cdot \bar{I} + \bar{\sigma}_V(\dot{\bar{\epsilon}}) & (\text{smc-3}) \end{cases}$$

avec :

$$\bar{\dot{\epsilon}} = \frac{1}{2} \left( \overrightarrow{\text{grad}} \vec{V} + {}^T \overrightarrow{\text{grad}} \vec{V} \right) \quad (\text{smc-4})$$

Vitesse d'un point matériel du SMC :

$$\vec{V} = v_1(x, y) \vec{i} + v_2(x, y) \vec{j} + v_3(x, y, z) \vec{k}$$

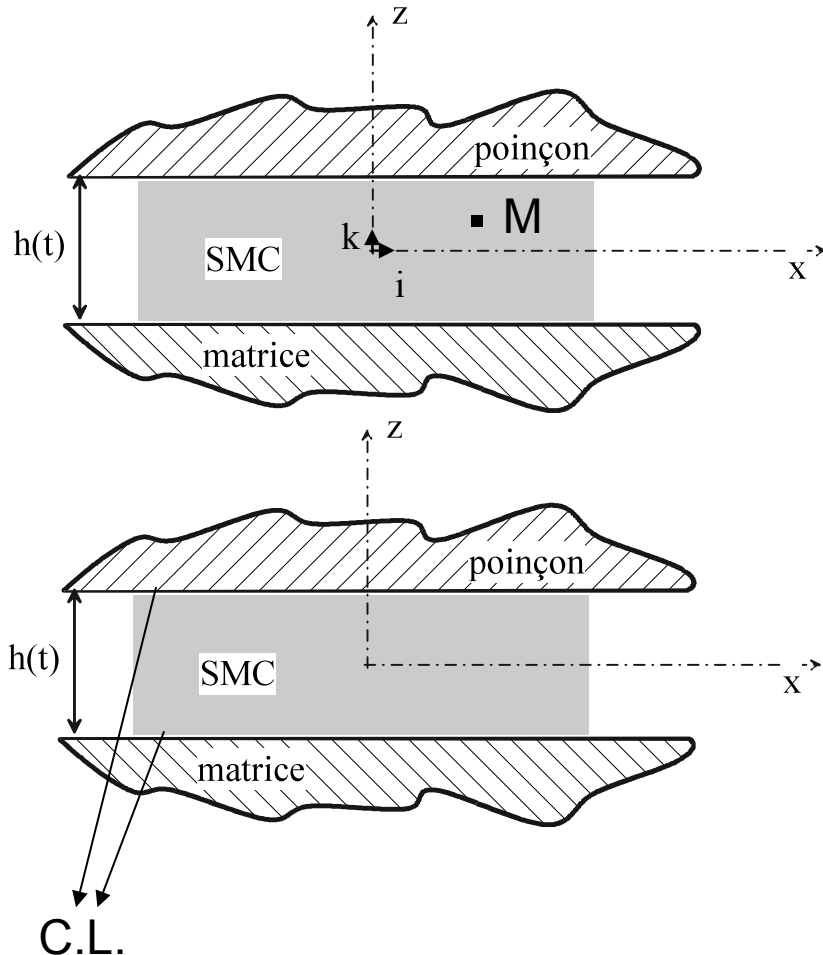
(smc-5) type « élongation »,  $v_1$  et  $v_2$  ne dépendent pas de  $z$



C

**C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation**

**C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)**



**f) Mécanique**

Pour un point matériel M de cote z, (smc-1)  
s'écrit :

$$v_{1,1}(x, y) + v_{2,2}(x, y) + v_{3,3}(x, y, z) = 0 \quad (\text{smc-6})$$

Condition d'imcompressibilité

$$v_{3,3}(x, y, z) = 0 \quad (\text{smc-7})$$

C.L.

$$v_3(x, y, z) = \frac{\dot{h}(x, y)}{2} \quad \text{pour} \quad z = (+h/2)$$

et

$$v_3(x, y, z) = -\frac{\dot{h}(x, y)}{2} \quad \text{pour} \quad z = -h/2$$



C

**C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation**

**C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)**

**f) Mécanique**

$$\text{div} \vec{V} = 0 \quad \text{s'écrit alors : } \underbrace{\frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial y}}_{\text{Représente l'étalement du SMC}} + \underbrace{\frac{\dot{h}}{h}}_{\text{Représente le mvt. d'écrasement de la presse}} = 0 \quad (\text{smc-9})$$

Représente l'étalement du SMC  
Sur les surfaces de la cavité

Représente le mvt. d'écrasement de la presse

$v_1$  et  $v_2$  ne dépendent pas de  $z$

et la forme du tenseur des vitesses de déformation est

$$(\text{smc-10}) \quad \bar{\dot{\epsilon}} = \begin{pmatrix} v_{1,1} & \frac{1}{2}(v_{1,2} + v_{2,1}) & 0 \\ \frac{1}{2}(v_{1,2} + v_{2,1}) & v_{2,2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\dot{h}}{h} \end{pmatrix}$$





C

**C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation**

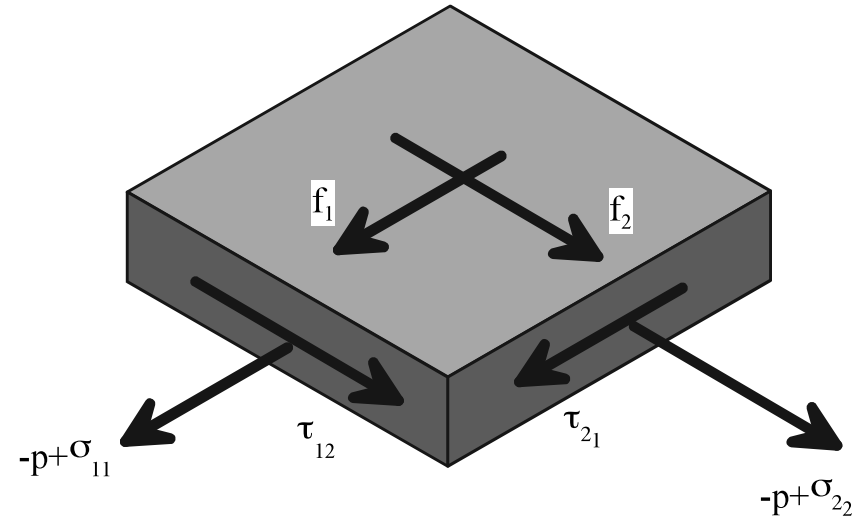
**C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)**

**f) Mécanique**

$$\bar{\sigma} = -p \cdot \bar{I} + \bar{\sigma}_V(\dot{\epsilon})$$

$$\bar{\sigma} = -p \cdot \bar{I} + \bar{\sigma}_V + \bar{f} \quad (\text{smc-10})$$

$$\text{avec } \bar{f} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & f_{13} \\ 0 & 0 & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} z=h/2 \\ \\ z=-h/2 \end{matrix}$$



$$\overrightarrow{\text{div}}(\bar{\sigma}) = \vec{0} \quad \text{devient en 2D :}$$

$$-\overrightarrow{\text{grad}}P + \frac{1}{h} \cdot (\vec{F}_\alpha) + \overrightarrow{\text{div}}(\bar{\sigma}_V) = 0 \quad (\text{smc-11}) \quad \underline{X} \text{ indique dans le plan } (\vec{i}, \vec{k}) \text{ et } \alpha \text{ vaut 1 ou 2}$$

$\underbrace{-\overrightarrow{\text{grad}}P}_{\text{Pression du moule provoquant l'écoulement}}$ 
 $\underbrace{\frac{1}{h} \cdot (\vec{F}_\alpha)}_{\text{Résistance à l'écoulement (viscosité du SMC)}}$ 
 $\underbrace{\overrightarrow{\text{div}}(\bar{\sigma}_V)}_{\text{Résistance à l'écoulement (frottement)}}$



**C**

## C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

### C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)

#### f) Mécanique

Intégration suivant dz de (smc-11) donne

$$P = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{+h/2} p \cdot dz \quad \text{et} \quad \underline{\underline{\sigma}}_V = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{+h/2} \underline{\underline{\sigma}}_V dz$$

(smc-12) (smc-13)

#### e) Les forces de frottement en $z = +h/2$ et $-h/2$ :

des forces tangentielles proportionnelles à la vitesse s'opposent au glissement

Plusieurs modèles possibles :

$$\vec{F} = \kappa \cdot \underline{\underline{V}} \quad (\text{smc-14})$$

$\kappa$ , fonction de la  $T^\circ$  de moule

(Barone, 1988)

$$\vec{F} = -\psi \cdot \left( \frac{\|\vec{V}\|}{v_0} \right)^{(m-1)} \cdot \underline{\underline{V}} \quad (\text{smc-15})$$

$\psi$ , coefficient hydrodynamique (voir diapo suivante)

$v_0$ , vitesse de référence

$m$ , tel que :

$m_{\text{matrice}} < m < m_{\text{SMC}}$  (exposant loi puissance viscosité)

(Dumont, 2007)



**C**

**C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation**

**C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)**

**g) Les forces de frottement**

Dans (smc-15), le coefficient hydrodynamique  $\psi$  est donné par :

$$\psi \approx \frac{\mu_{c0}}{\delta_c^m} \cdot \left( \frac{v_0}{\dot{\gamma}_0} \right)^{(m-1)}$$

Avec  $\mu_{c0}$  viscosité des couches aux limites dépendant de  $T^\circ$ ,  $V_f$  et l'orientation des fibres)  
 $\delta_c$ , épaisseur caractéristique de ces couches et  $v_0$  et  $\dot{\gamma}_0$  respectivement vitesse et vitesse de déformation de référence.

**h) Rhéologie**

Cas le plus répandu : loi puissance

$$\eta_c = A_c \cdot \dot{\gamma}^{(m-1)} \quad (\text{cisaillement})$$

$$\eta_e = A_e \cdot \dot{\epsilon}^{(n-1)} \quad (\text{élongation}) \quad (\text{smc-16})$$



**C**

**C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation**

**C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)**

**h) Rhéologie**

Loi puissance (fonction de la déformation)  $\eta_e = A_e(\varepsilon) \cdot \dot{\varepsilon}^{(n-1)}$  (smc-16b)

Avec  $A_e$ , consistance du matériau ( $\text{Pa} \cdot \text{s}^m$ )° et  $m$ , indice pseudoplasticité ( $m$  ou  $n = 1$  : newtonien)  
P.B. fonctionne bien pour taux de déformation grands mais donne une viscosité infinie si cisaillement nul !

La loi de comportement est donnée par : (Dumont, 2007)

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{\underline{\sigma_V}} = \eta_e \cdot A_e \cdot \left( \frac{\dot{\varepsilon}_e}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{(n-1)} \cdot \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} \\ \text{et} \\ \sigma_{33V} = \eta_e A_e \cdot \left( \frac{\dot{\varepsilon}_e}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{(n-1)} \cdot \frac{\dot{h}}{h} \end{array} \right. \quad \underline{\underline{X}} \text{ indique dans le plan } (\vec{i}, \vec{k}) \quad \text{(smc-17)}$$

Avec ici  $A_e$  donné par :  $A_e = g(V_f)$

et la viscosité par :  $\eta_e = \underbrace{\eta_{cp(smc)}} \cdot [r(V_f)]^{\left(\frac{n+1}{2}\right)}$

Viscosité du smc sous contraintes planes



C

**C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation**

**C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)**

Si on veut prendre en compte la  $T^\circ$  et son influence sur la viscosité : loi de type Arrhénius

$$\eta_{cp} = \eta_{cp}^0 \cdot \exp\left[\frac{-E}{R \cdot T}\right]$$

**i) Bilan / analyse**

Pour mettre en évidence un couplage entre la rhéologie et l'orientation des fibres dans le cadre du SMC, on peut utiliser le rapport des forces de frottement sur les forces visqueuses.

Si on réduit le problème à un écoulement 1D suivant x

- le vecteur vitesses (smc-5) se réduit à :  $\vec{V} = v_1(x) \cdot \vec{i} + \frac{\dot{h}}{h} \cdot z \cdot \vec{k}$

- le tenseur des vitesses de déformation (smc-10) devient :  $\dot{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_1}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\dot{h}}{h} \end{bmatrix}$



**C**

**C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation**

**C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)**

**i) Bilan / analyse**

- La conservation de la masse (smc-1) donne :  $\frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\dot{h}}{h} = 0$

La solution est (avec pour C.L.  $v_1(x=0)=0$ ) :  $\longrightarrow v_1(x) = -\frac{\dot{h}}{h} \cdot x$

- Le tenseur des contraintes visqueuses est à présent :  
(loi de comportement rhéologique (smc-16, élongation))

$$\bar{\sigma}_v = A_e \cdot \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial v_1}{\partial x}\right)^{(n-1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{\dot{h}}{h}\right)^{(n-1)} \end{bmatrix}$$

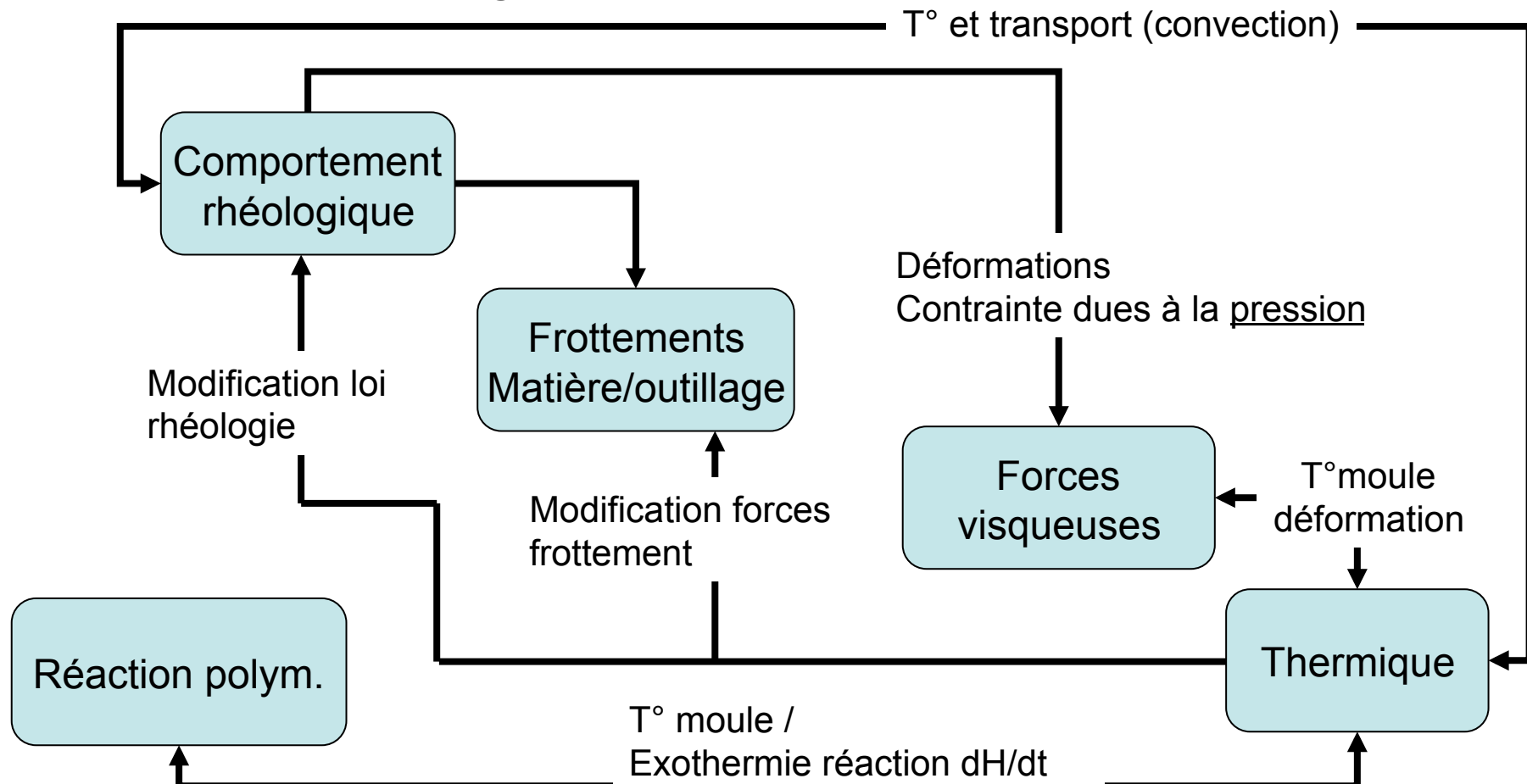


C

## C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

### C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)

#### d) Quels couplages attendus ?





## C

### C.2 Procédés : Compression SMC. Paramètres, simulation

#### C.2.1 Moulage compression poinçon / matrice (SMC, BMC)

##### Quelques références bibliographiques SMC

- M.R. Barone, D.A. Caulk, *Mechanics of compression molding*, Proceeding of ASME, The Manufacturing Science of Composites, Vol. IV, p 63-77, Atlanta (Georgia), 17-20 April **1988**.
- H.T. Kau, *An experimental study of the dynamics of curing process of sheet molding compound (SMC) Paste*, Polymer Engineering and Science, Vol. 29(18), pp. 1286-1297, **1989**.
- D.K. Kim, H.Y. Choi, N. Kim, *Experimental investigation and numerical simulation of SMC in compression molding*, J. of Materials Processing Technology, Vol. 49, pp 333-344. **1995**
- J.H. Jeong, K.T. Kim, Y.T. Im, *Plane-strain compression molding analysis of sheet molding compounds in flat and cross-sectional T-shape molds* J. of Materials Processing Technology, Vol. 57, pp 320-331. **1996**
- S.Y. Kim, Y.T. Im, *Three-dimensional finite-element analysis of the compression molding compound*, J. of Materials Processing Technology, Vol. 67, pp 207-213. **1997**.
- G. Kotsikos, A.G. Gibson, *Investigation of the squeeze flow behaviour of sheet moulding compounds (SMC)*. Composites Part A, Vol. 29A, pp. 1569-1577. **1998**.
- S. Le Corre, L. Orgéas, D. Favier & Al. *Shear and compression behaviour of sheet moulding compounds*. Composites Science and Technology, Vol. 62, pp 571-577. **2002**.
- P.T. Odenberger, H.M. Andersson, T.S. Lundström, *Experimental flow visualisation in compression moulding of SMC*, Composites Part A, Vol. 35, pp. 1125-1134, **2004**.
- P. Dumont, L. Orgéas, D. favier et Al. *Compression moulding of SMC : in situ experiments, modelling and simulations*, Composites Part A, Vol. 38, pp. 353-368, **2007**



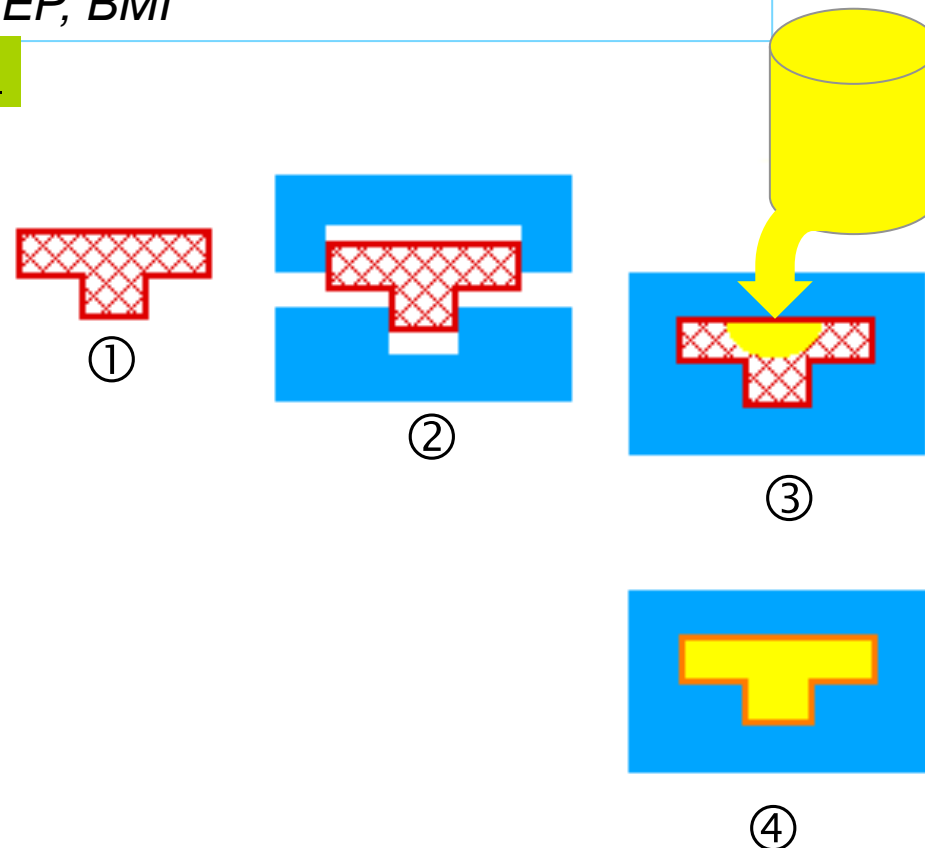


C

## C.3 Procédés : RTM. Paramètres, simulation

C.3.1 RTM *Vinylester, UP, EP, BMI*

Principe RTM en moule fermé



Presse RTM pression constante ICA  
(2 machines) Dim. 450 x 450 mm –  $P_{inject.}$  4 bar – 230°C  
+ 1 système d'injection à débit constant

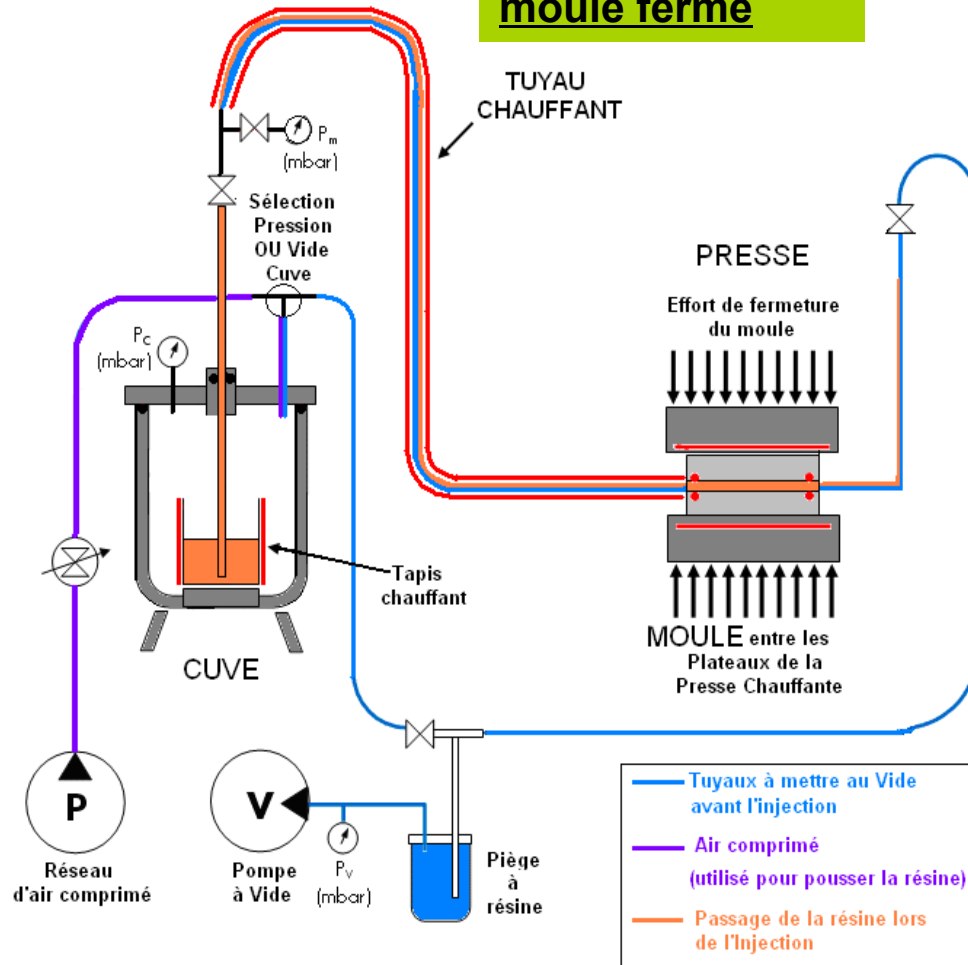


**C**

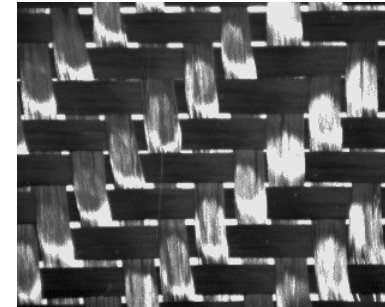
## C.3 Procédés : RTM. Paramètres, simulation

### C.3.1 RTM

#### Principe RTM en moule fermé



- T° injection
- Pression injection ou débit d'injection
- Niveau de vide cuve (ou débit si système débit cte.)
- T° moule ou plateaux presse
- Niveau de vide (si VARTM)
- Moule / injection (points, canaux)
- Masse matrice injectée



#### Paramètres matériaux :

- Viscosité résine,  $\mu$
- Perméabilité renforts,  $K_{ij}$
- Mouillabilité des fibres

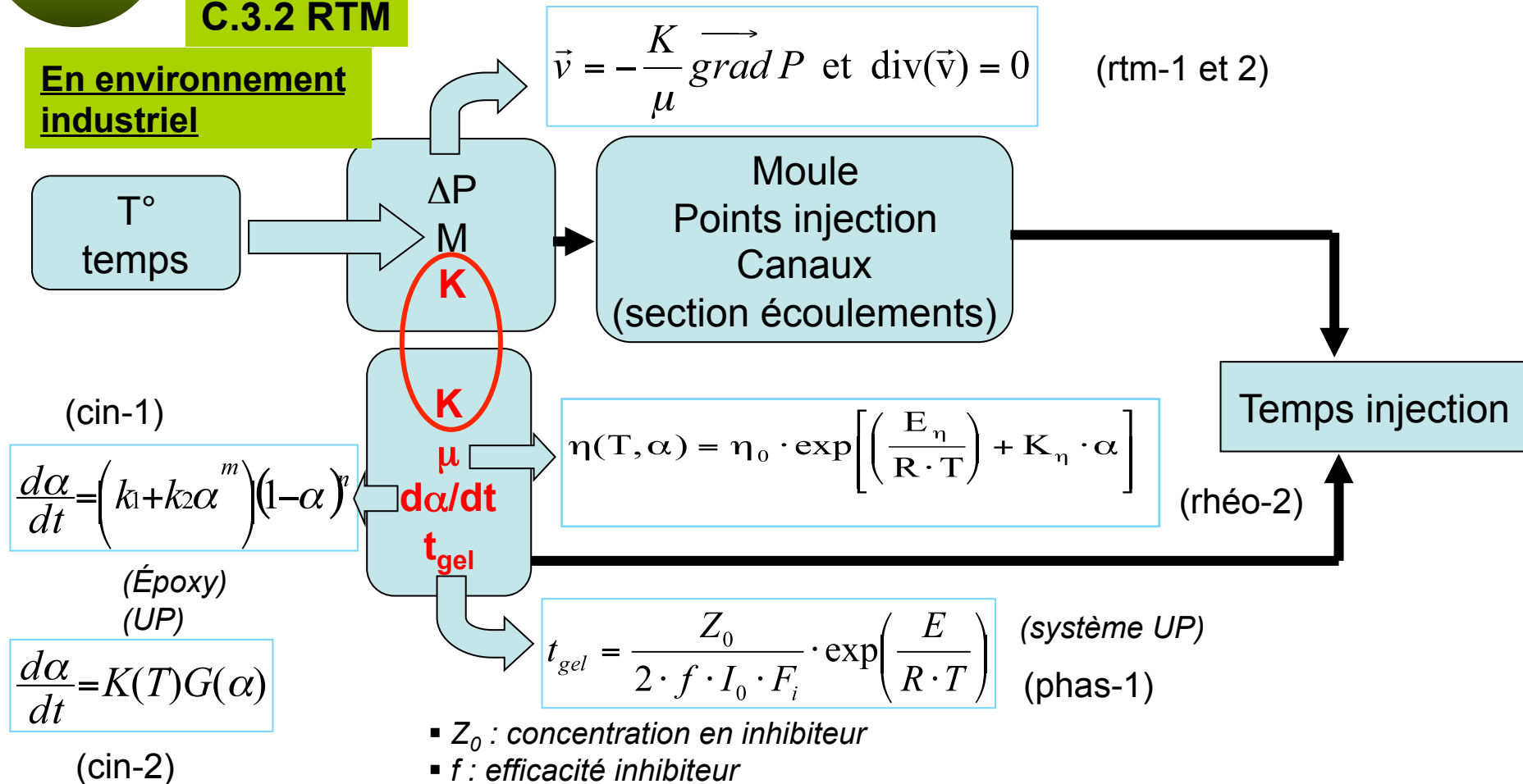


**C**

## C.3 Procédés : RTM. Paramètres, simulation

### C.3.2 RTM

**En environnement  
industriel**



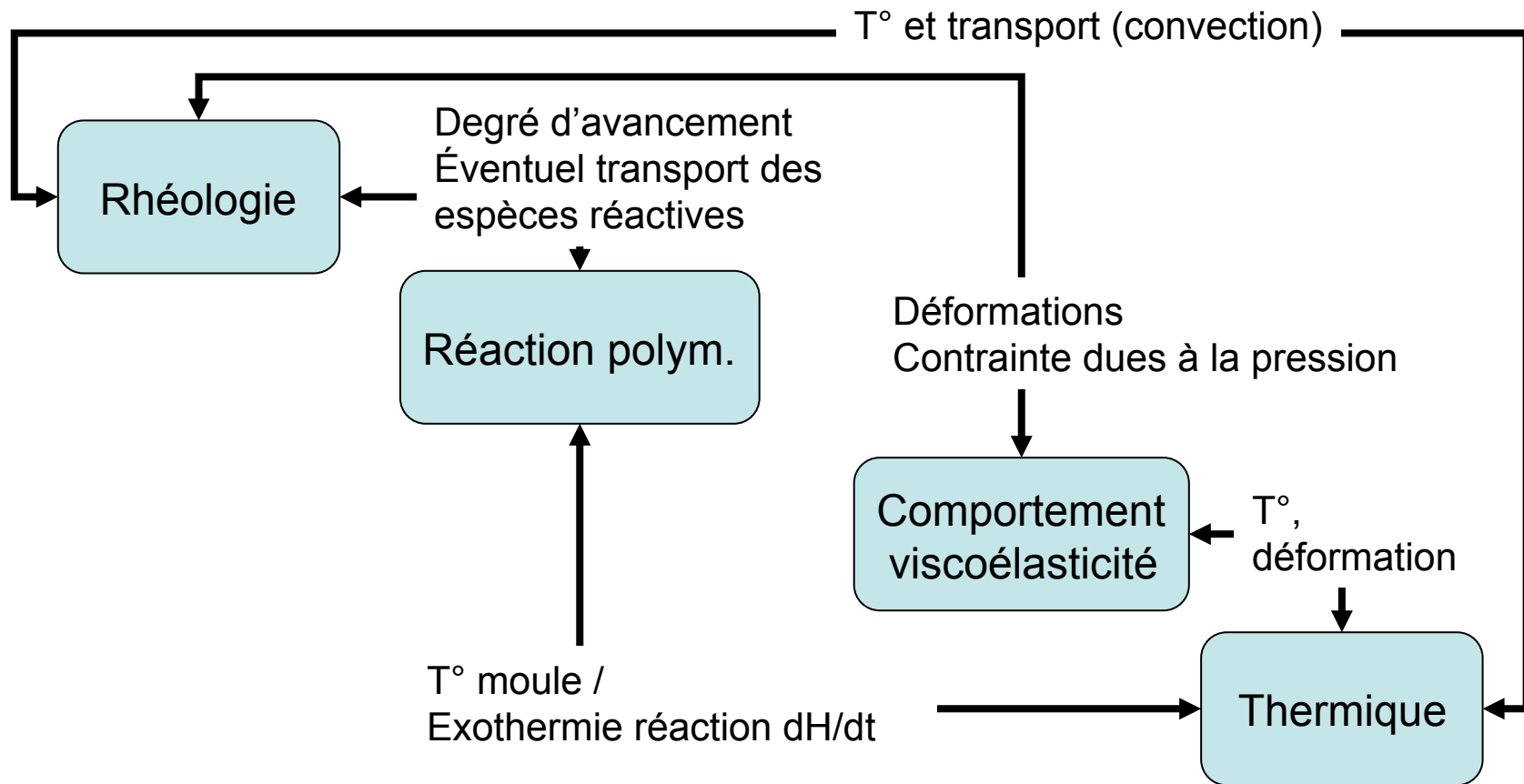
- $Z_0$  : concentration en inhibiteur
- $f$  : efficacité inhibiteur
- $I_0$  : concentration en initiateur de réaction
- $F_i$  : facteur pré-exponentiel énergie activation réaction dissociation initiateur



C

## C.3 Procédés : RTM. Paramètres, simulation

### C.3.3 RTM Quels couplages ?

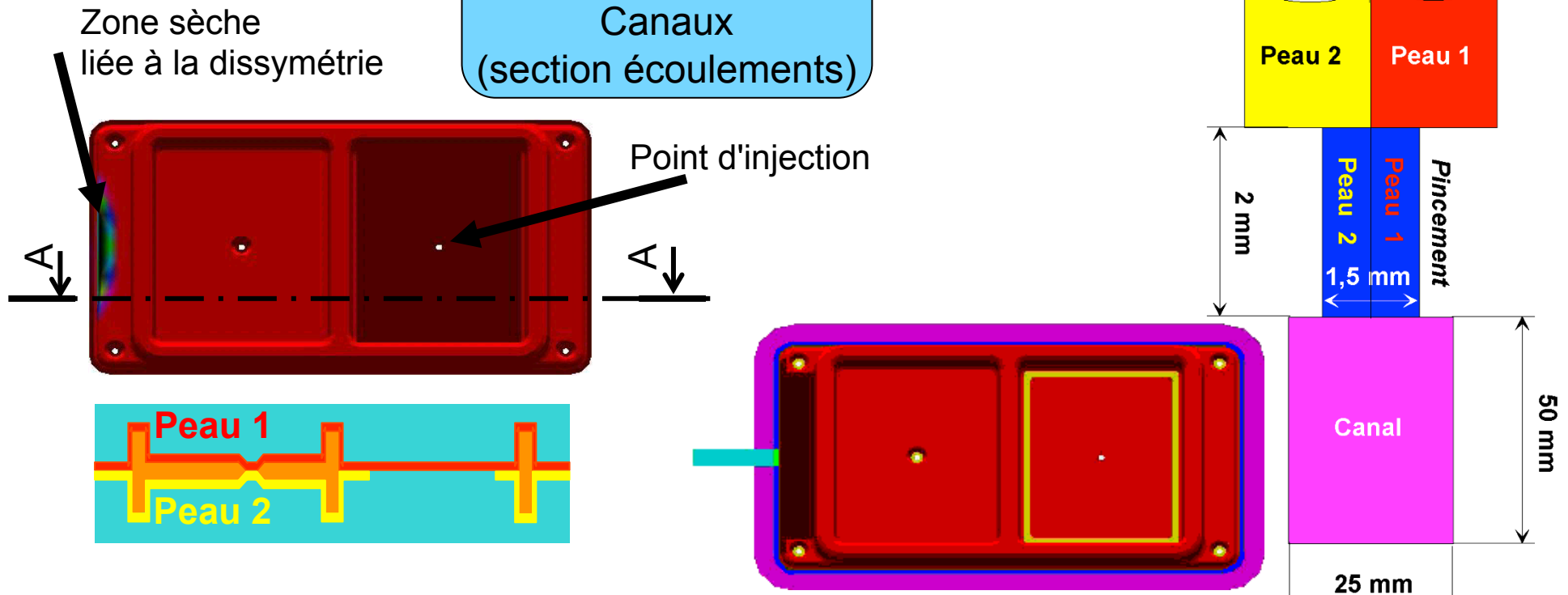




## C.3 Procédés : RTM. Paramètres, simulation

### C.3.4 RTM exemple

Moule  
Points injection  
Canaux  
(section écoulements)



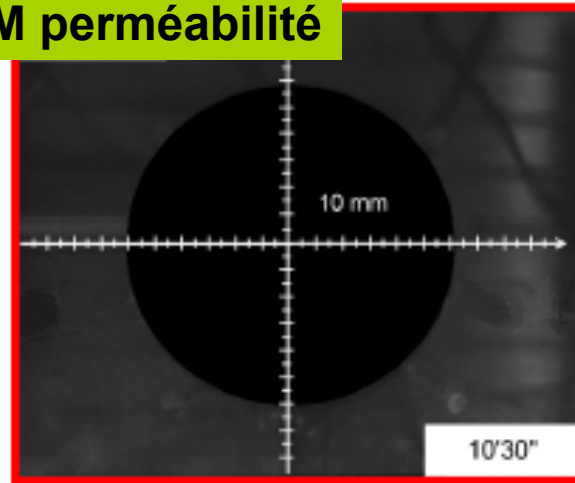
Zone						
Nom	peau 1	peau 2	raccord	réservoir	pincement	canal
K (m <sup>2</sup> )	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$0,5 \cdot 10^{-9}$	$10^{-11}$	1	$10^{-13}$	$10^{-7}$



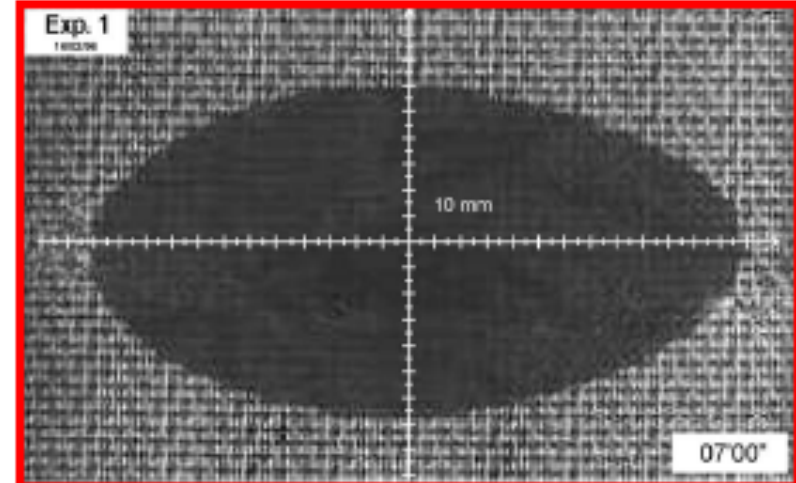
C

## C.3 Procédés : RTM. Paramètres, simulation

### C.3.5 RTM perméabilité



Mat de fibres de carbone

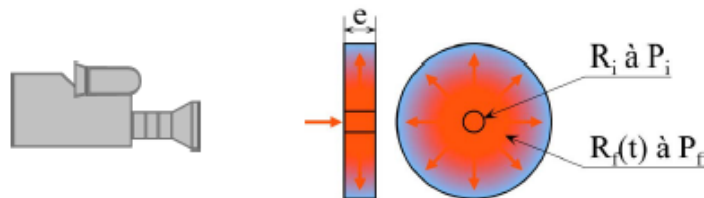


Tissu hybride fibres de verre / fibres de carbone

• Mesures de perméabilité :  
choix du type de renfort

Equations de base :  $\vec{v} = -\frac{K}{\mu} \text{grad} P$  et  $\text{div}(\vec{v}) = 0$

$$\left(\frac{R_f}{R_i}\right)^2 \left[ 2 \cdot \ln \frac{R_f}{R_i} - 1 \right] + 1 = \frac{4 \cdot K \cdot (P_i - P_f) \cdot t}{\varepsilon \cdot \mu \cdot R_i^2}$$



*BRITE / EurAM II project BE5477  
(1992-1996) : Valeurs de perméabilités  
différents textiles*



**C**

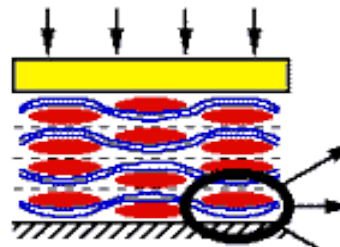
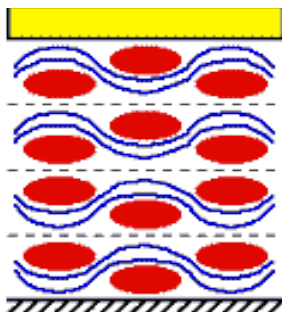
## C.3 Procédés : RTM. Paramètres, simulation

### C.3.6 RTM Compression préforme

*Avant*

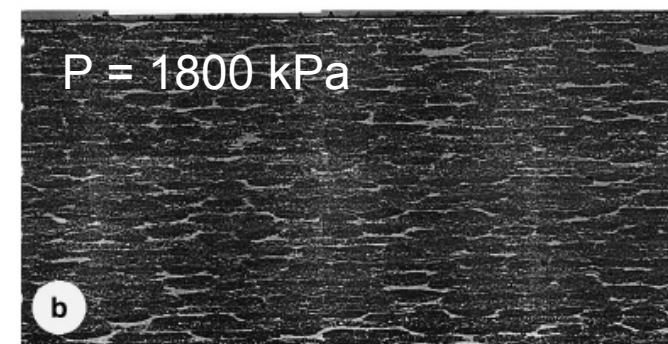
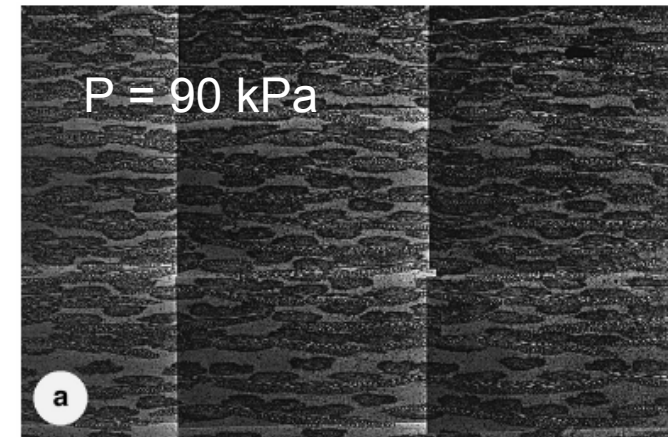
*Après compactage*

*Force fermeture du moule*



*Regroupements :*  
- entre couches  
- de fibres  
*Réorientations fibres*

*Empilement de tissus*



Sans compter sur le « nesting » entre les couches

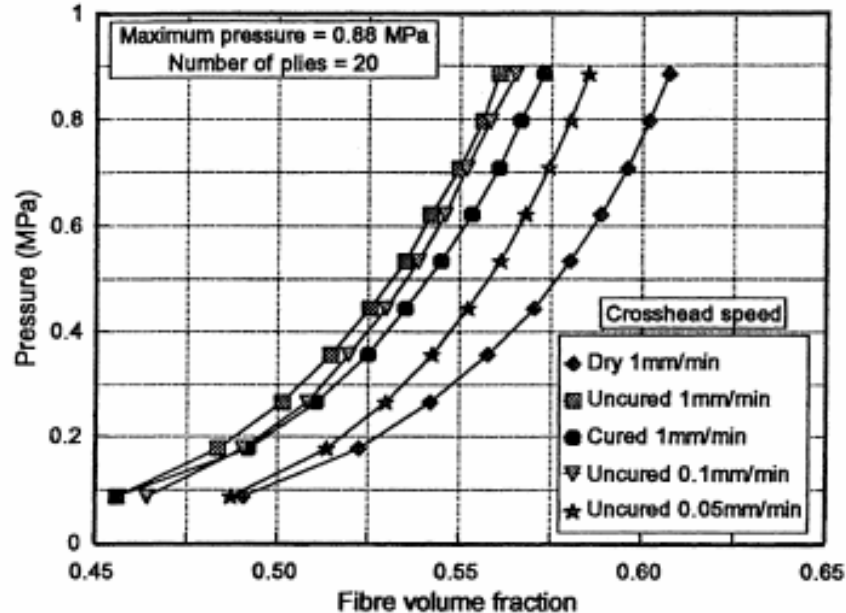


C

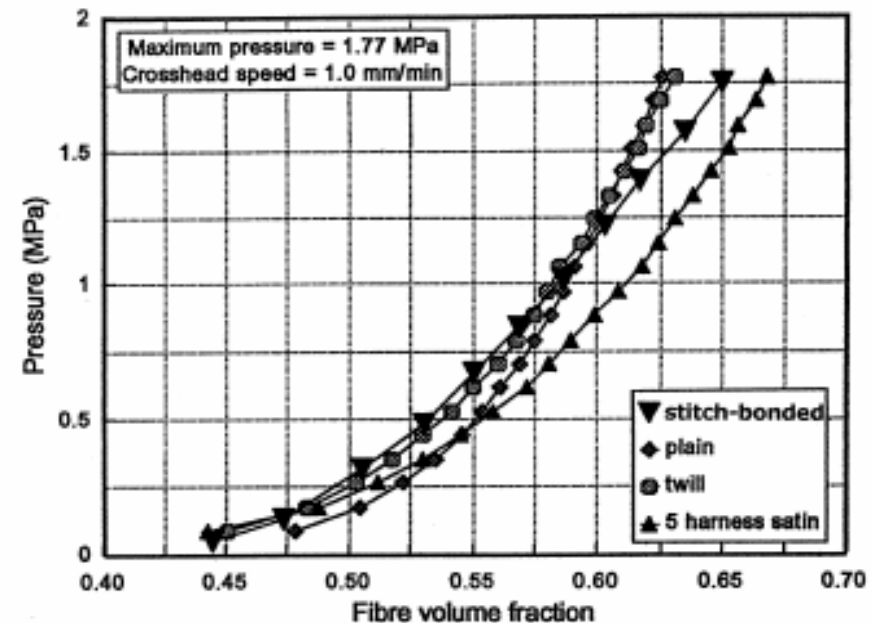
## C.3 Procédés : RTM. Paramètres, simulation

### C.3.6 RTM Compression préforme

UP + taffetas / niveau cuisson matrice UP



UP + taffetas ou satin 5 ou sergé



### Les lois les + simples

Quinn and Randall

$$V_f = K_1 + K_2 \cdot \sqrt{P}$$

- $K, K_2$ , ctes.
- $P$ , pression appliquée

Toll and Manson

$$P = k \cdot E \cdot (V_f^n - V_{fo}^n)$$

- $k$ , cte.
- $E$ , module fibres
- $V_f$ , fraction volumique
- $V_{fo}$ , fraction volumique fibres limite
- $n$ , exposant





## C

### C.4 Procédés : Autoclave. Paramètres, simulation

#### C.4.1 Moulage au sac à vide – cuisson autoclave

*Epoxy, BMI, Cyanate,  
Cyanate-ester  
PEEK...*



*Autoclave ICA  
20 bar, 450°C,  
Ø 1,2m, 24 thermocouples,  
4 fibres optiques RdB*

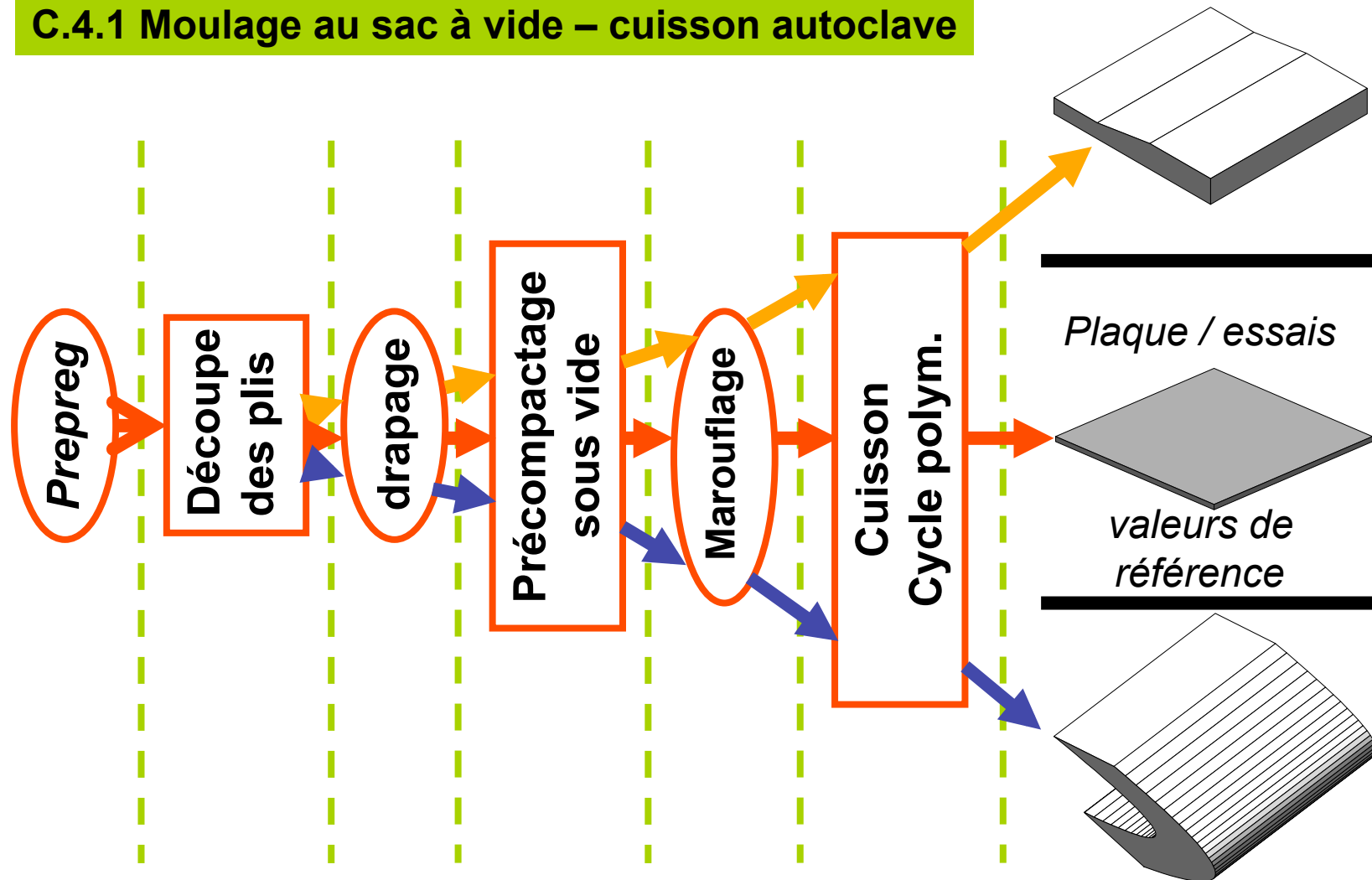
- Niveau de vide et durée précomp.
- Niveau de vide en cycle
- Température
- Pression
- Produits d'environnement



C

## C.4 Procédés : Autoclave. Paramètres, simulation

### C.4.1 Moulage au sac à vide – cuisson autoclave



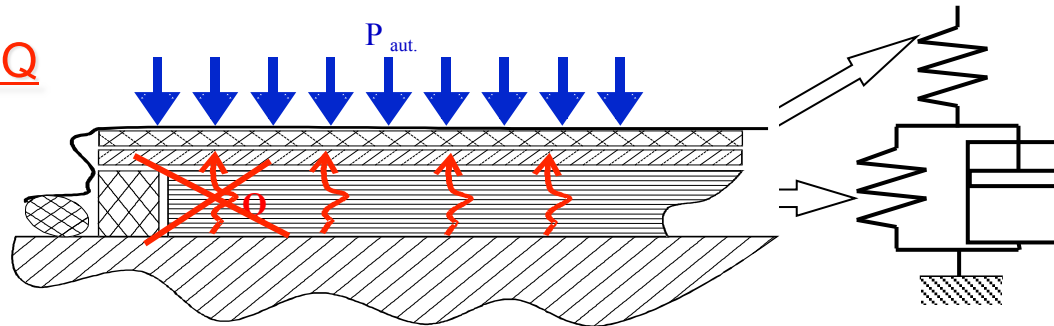


C

## C.4 Procédés : Autoclave. Paramètres, simulation

### C.4.2 Moulage au sac à vide – cuisson autoclave Composites à matrice TP

TP : pas de flux Q



$$P = \frac{4}{3} \cdot \eta \cdot C_0 \cdot \frac{a^2}{r_f^2} \cdot \frac{V_f}{(1 - V_f)^3} \cdot A \cdot \frac{dh}{dt}$$

- $P$  : pression (Pa)
- $h$  : viscosité polymère fondu à  $T^\circ$  de l'isotherme de mise en oeuvre (Pa.s)
- $C_0$  : coefficient de consolidation
- $r_f$  : rayon fibre (mm)
- $V_f$  : fraction volumique de fibres (%)
- $A$  : surface de la pièce soumise à la pression (mm<sup>2</sup>)
- $h$  : épaisseur de la pièce (mm)
- $t$  : temps (s)

$$D_{ad} = Z \cdot (a_T \cdot t_{cref})^{1/4}$$

- $D_{ad}$  : degré d'adhésion :  $D_{ad} \leq 1$
  - $Z$  : constante
  - $a_T$  : facteur de glissement WLF :
- $$\text{Log}(a_T) = \frac{C_1 \cdot (T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})}$$
- $t_{cref}$  : durée du contact à  $T_{ref}$  (s)

Aux températures différentes de  $T_{ref}$  :

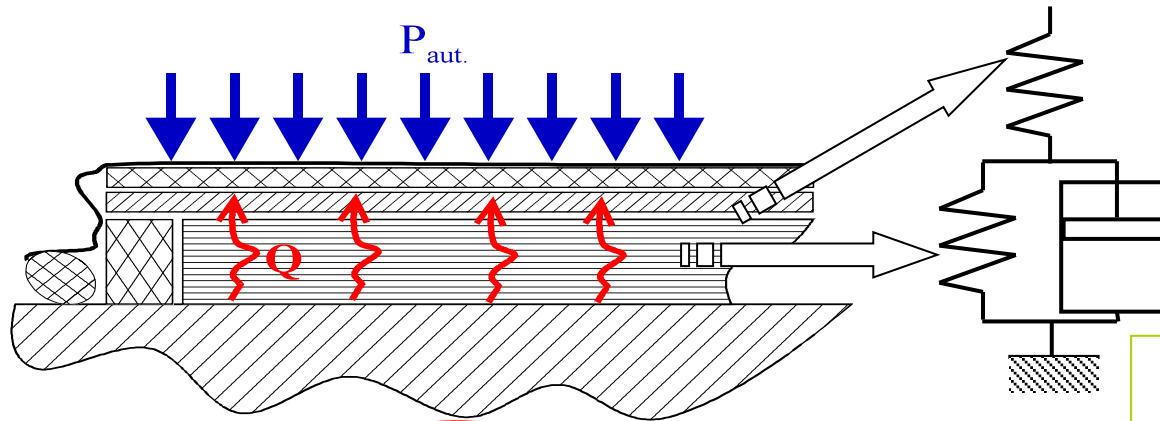
$$tc = a_T \cdot t_{cref}$$



C

## C.4 Procédés : Autoclave. Paramètres, simulation

### C.4.3 Moulage au sac à vide – cuisson autoclave Composites à matrice TD



$$P_{\text{autoclave}} = P_{\text{résine}} + \sigma_{p(\text{autoclave})}^{\text{fibres}}$$

$$Q_z = -\frac{S}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial z}$$

- $S$ , perméabilité (suivant  $z$ )
- $\mu$ , viscosité résine
- $dp/dz$ , gradient de pression dans le stratifié

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot \pi \cdot E_f}{\gamma^4} \cdot \frac{\sqrt{\frac{V_f}{V_0}} - 1}{\left[ \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right]^4}$$

- $E_f$ , module de flexion des fibres
  - $V_a$ , fraction volumique de fibres maximale
  - $V_f$ , fraction volumique de fibre réelle dans le stratifié
  - $V_0$ , fraction volumique de fibres du préimprégné
- $$\gamma^4 = L/(h-\phi f)$$

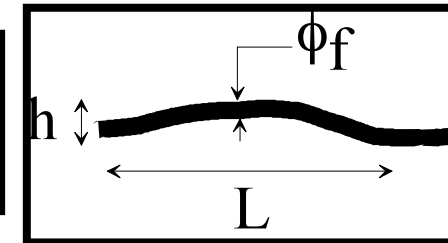
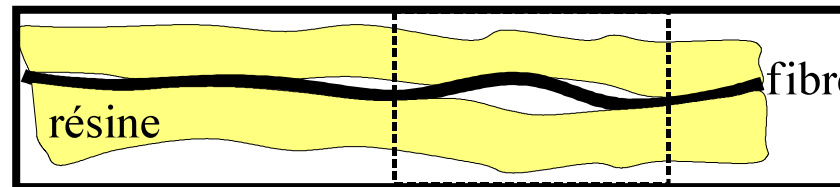


C

## C.4 Procédés : Autoclave. Paramètres, simulation

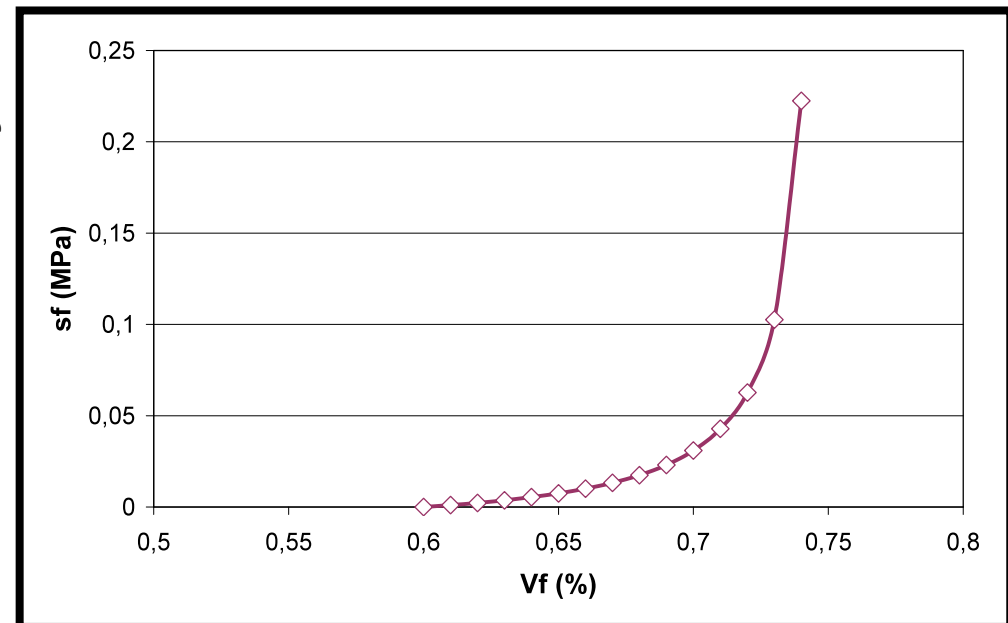
### C.4.4 Moulage au sac à vide – cuisson autoclave Composites à matrice TD

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot \pi \cdot E_f}{\gamma^4} \cdot \frac{\sqrt{\frac{V_f}{V_0}} - 1}{\left[ \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right]^4}$$



- $E_f$ , module de flexion des fibres
- $V_a$ , fraction volumique de fibres maximale
- $V_f$ , fraction volumique de fibre réelle dans le stratifié
- $V_0$ , fraction volumique de fibres du préimprégné

$$\gamma^4 = L / (h - \phi_f)$$





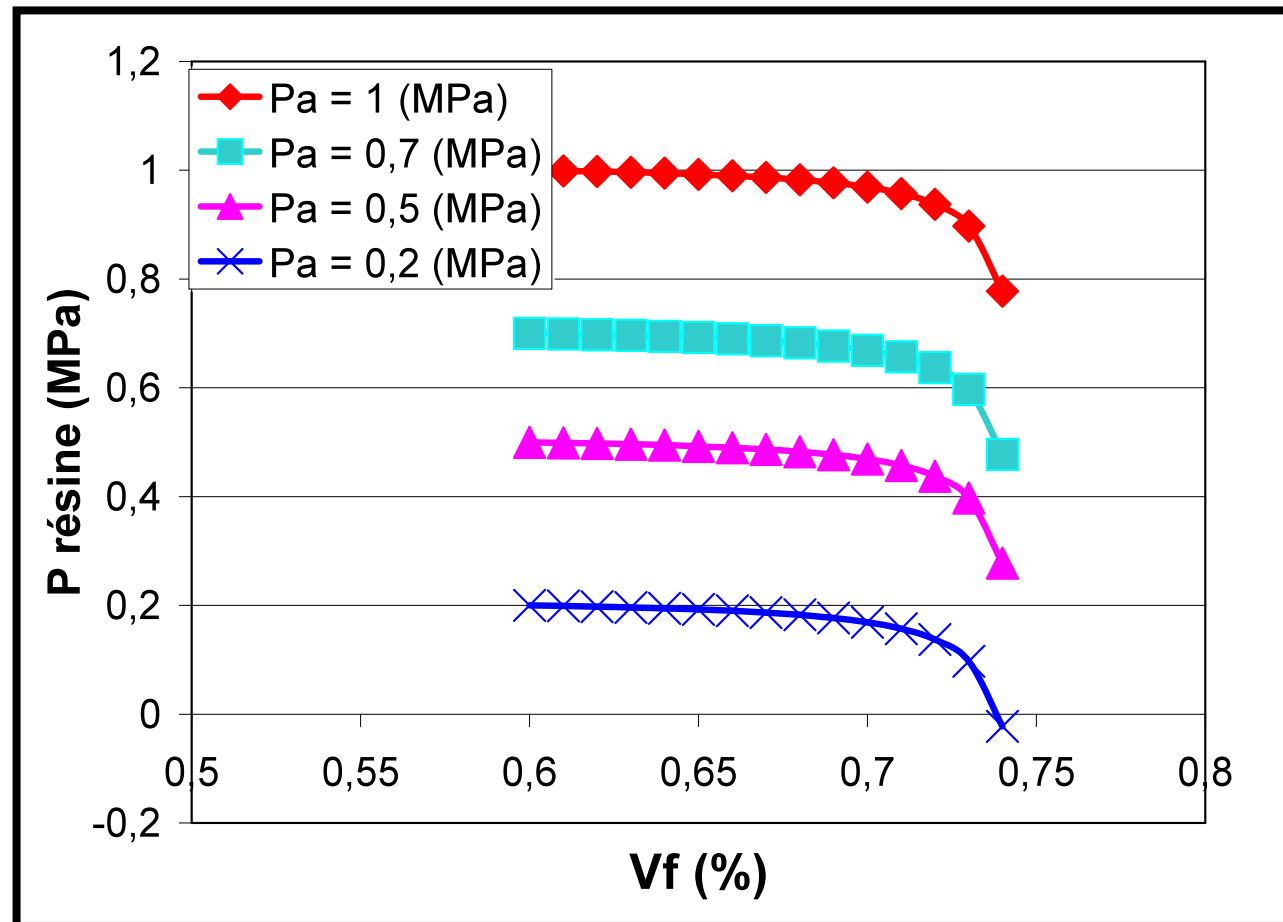
C

## C.4 Procédés : Autoclave. Paramètres, simulation

### C.4.4 Moulage au sac à vide – cuisson autoclave Composites à matrice TD

En l'absence  
de flux de  
résine suivant z

$$P_{\text{autoclave}} = P_{\text{résine}} + \sigma_{p(\text{autoclave})}^{\text{fibres}}$$





**C**

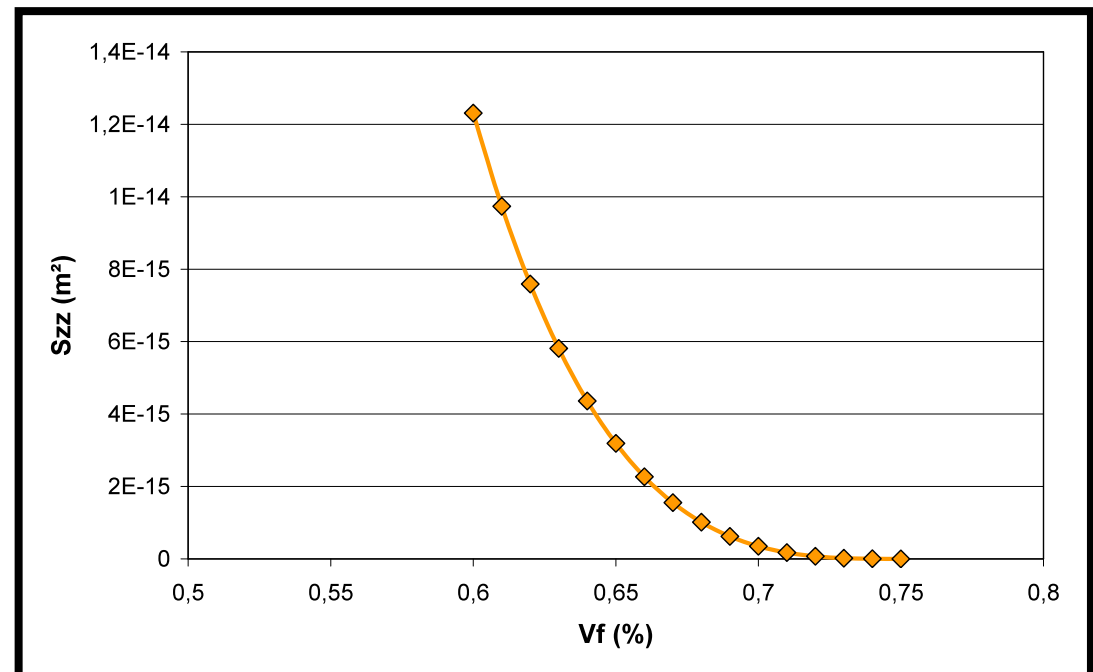
## C.4 Procédés : Autoclave. Paramètres, simulation

### C.4.4 Moulage au sac à vide – cuisson autoclave Composites à matrice TD

$$Q_z = -\frac{S}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial z}$$

- $S$ , perméabilité (suivant  $z$ )
- $\mu$ , viscosité résine
- $dp/dz$ , gradient de pression dans le stratifié

$$S_{zz} = \frac{\left(\frac{\phi f}{2}\right)^2}{4 \cdot k_{zz}} \cdot \frac{\left[\sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1\right]^3}{\left[\frac{V_a}{V_f} + 1\right]}$$





**C**

## C.4 Procédés : Autoclave. Paramètres, simulation

### C.4.4 Moulage au sac à vide – cuisson autoclave Composites à matrice TD

Influence du degré d'avancement d'un système  
thermodurcissable époxy sur différentes propriétés mécaniques

Degré d'avancement $\alpha$	60%	70%	80%	90%	96%
$E_l$ traction (MPa)	172425	179322	182770	175870	175870
$E_l$ compression (MPa)	171730	181390	178630	171050	187600
$E_t$ traction (MPa)	11300	11250	11150	11600	11100
$E_t$ compression (MPa)	10070	9930	10700	10350	10600
$G_{lt}$ (MPa)	7650	7520	7450	8000	7660
Rupture traction sens long (MPa)	1950	1940	1880	1870	1880
Rupture compression sens long (MPa)	1230	13340	1380	1360	1330
Rupture traction sens travers (MPa)	43	58	50	54	45
Rupture compression sens travers (MPa)	210	250	220	280	270
Rupture cisaillement interlaminaire (MPa)	103	115	118	133	99





**C**

## C.4 Procédés : Autoclave. Paramètres, simulation

### C.4.4 Moulage au sac à vide – cuisson autoclave Composites à matrice TD

Influence du degré d'avancement d'un système thermodurcissable époxy

Degré d'avancement de la réaction $\alpha$	82%	88%	92%	99%
$E_l$ traction (MPa)	131900	133200	129600	132600
$E_t$ traction (MPa)	8650	8550	8500	8700
Rupture traction sens long (MPa)	2190	2010	1830	1930
Rupture traction sens travers (MPa)	45	48	53	60
$\alpha_l$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$-1,2 \cdot 10^{-6}$	$-2,3 \cdot 10^{-6}$	$-1,0 \cdot 10^{-6}$	$-1,1 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_t$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) $T^{\circ} < T_g$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$
$\alpha_t$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) $T^{\circ} > T_g$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$
$v_{lt}$	0,330	0,315	0,355	0,325
$v_{tl}$	0,023	0,023	0,024	0,024
$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	157	159	161	159
$V_f$ (%)	65,4	66,4	66,5	65,1

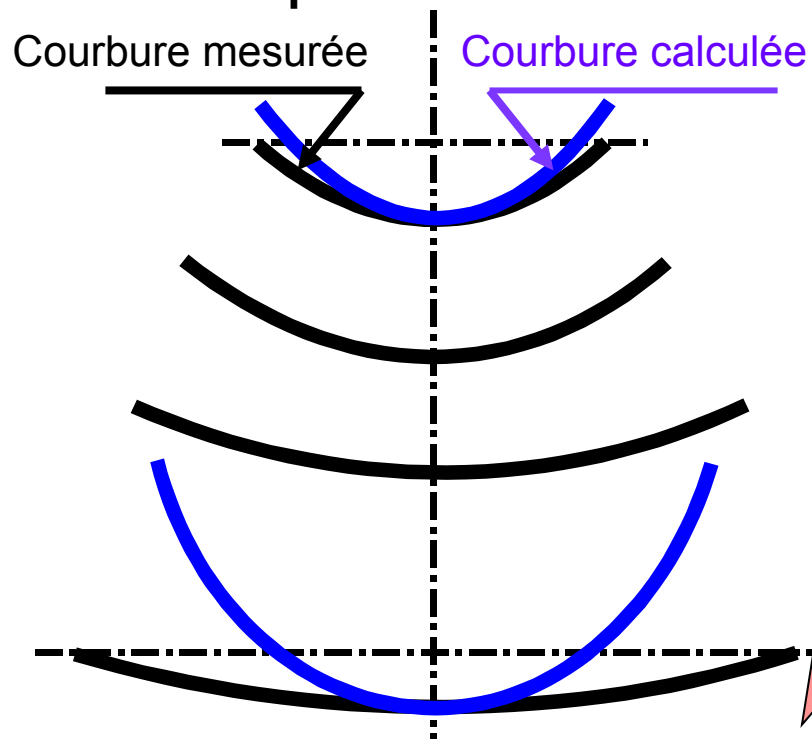


C

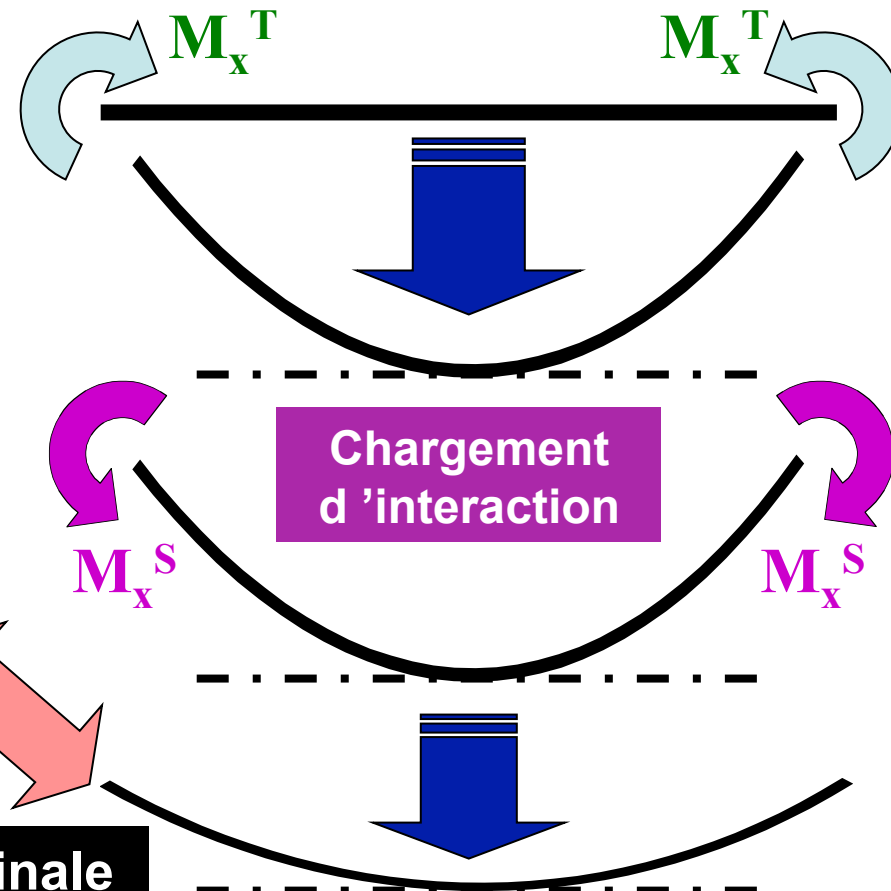
## C.4 Procédés : Autoclave. Paramètres, simulation

### C.4.5 Moulage au sac à vide – cuisson autoclave - CRC

Proposition d'un modèle



Chargement thermique



Courbure finale



**C**

## C.4 Procédés : Autoclave. Paramètres, simulation

### C.4.5 Moulage au sac à vide – cuisson autoclave - CRC

#### Chargement thermique

$$\begin{Bmatrix} N^T \\ M^T \end{Bmatrix}_{x,y} = \Delta T \cdot \begin{Bmatrix} F \\ G \end{Bmatrix}_{x,y}$$

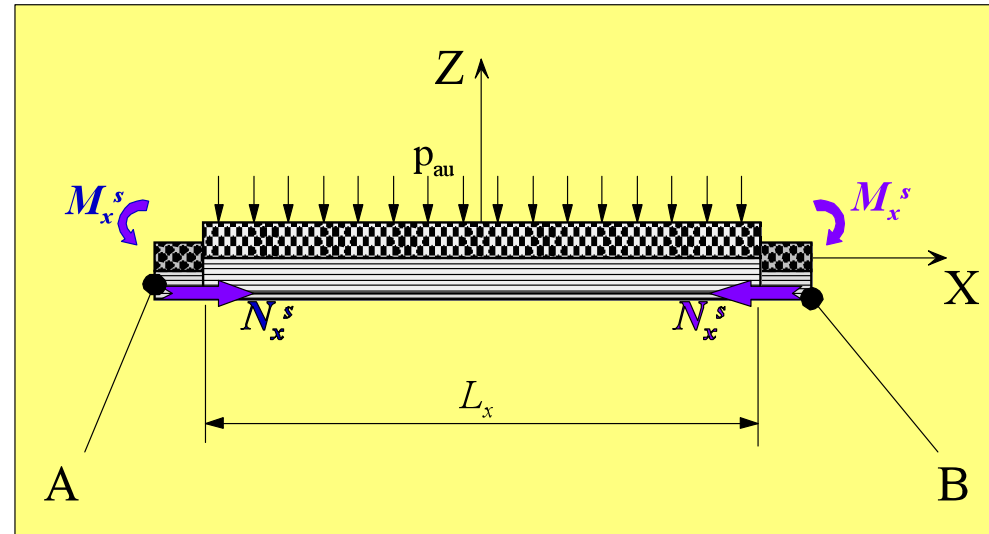
#### Chargement d'interaction

##### Efforts d'interaction

$$\begin{Bmatrix} N_x^s = f_1(\sigma_{xz}) = g_1(L_x) \\ N_y^s = f_2(\sigma_{yz}) = g_2(L_y) \end{Bmatrix}$$

##### Moments d'interaction

$$\begin{Bmatrix} M_x^s = \frac{h}{2} \cdot f_1(\sigma_{xz}) = \frac{h}{2} \cdot g_1(L_x) \\ M_y^s = \frac{h}{2} \cdot f_2(\sigma_{yz}) = \frac{h}{2} \cdot g_2(L_y) \end{Bmatrix}$$



Interprétation physique d'interaction entre le moule et le stratifié.

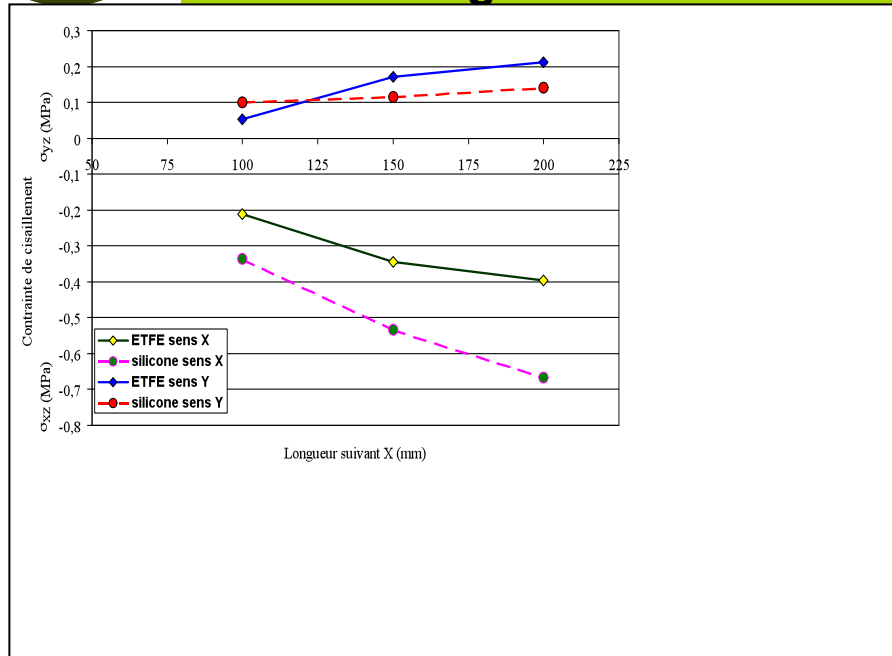
#### Chargement global

$$\begin{Bmatrix} N_{x,y}^* \\ M_{x,y}^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_{x,y}^T - N_{x,y}^s \\ M_{x,y}^T - M_{x,y}^s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix}_{x,y}$$

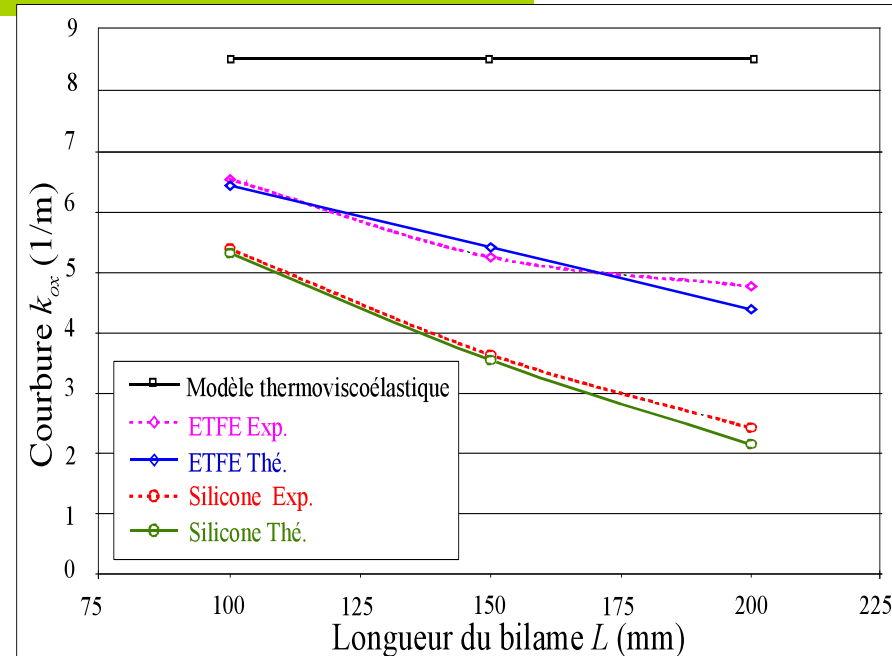


## C.4 Procédés : Autoclave. Paramètres, simulation

### C.4.4 Moulage au sac à vide – cuisson autoclave - CRC



Contrainte de glissement calculée en fonction de longueur du stratifié pour chaque type de démoulant.



Comparaison entre les courbures réduites mesurées et calculées sans interaction et avec l'interaction.

Production stratifiés  $[0^\circ_2/90^\circ_2]$  à courbure nulle  $k_{ox} = 0$  avec  $(L_x/L_y = 10)$

$$\begin{Bmatrix} N^* \\ M^* \end{Bmatrix}_{x,y} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}_{x,y} \longrightarrow \begin{Bmatrix} N^T \\ M^T \end{Bmatrix}_{x,y} = \begin{Bmatrix} N^s \\ M^s \end{Bmatrix}_{x,y} \quad \begin{Bmatrix} L_x \\ L_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 650 \text{ mm pour démoulant ETFE} \\ 450 \text{ mm pour démoulant silicone} \end{Bmatrix}$$



## Quelques références bibliographiques

- Lee, S.Y. and G.S. Springer,  
Effects of cure on the mechanical properties of composites,  
Journal of Composite Materials. 1988. 22(january): p. 15-29.
- Lee, S.Y. and G.S. Springer,  
Filament winding cylinders - part I: Process model.  
Journal of Composite Materials, 1990. 24(12): p. 1270-1298.
- Lee, S.Y. and G.S. Springer,  
Filament winding cylinders - part III: Selection of process variables.  
Journal of Composite Materials, 1990. 24(12): p. 1344-1366.
- Cohen, D.,  
Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength.  
Composites Part A, 1997, 28A: p. 1035-1047.
- Cavarero, M., P. Olivier and J.P. Cottu,  
Etude de l'influence des conditions d'élaboration des stratifiés carbone époxy épais sur leurs  
caractéristiques mécaniques longitudinales. in Comptes rendus des JNC11,  
Publiés par J. Lamon & D. Baptiste. Arcachon 18-20 novembre 1998. 1: p. 147-155.
- Olivier, P., B. Ferret and J.P. Cottu,  
Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates.  
Composites. 1995. 26(7): p. 509-515.
- Olivier, P., Contribution à l'analyse de l'influence des conditions d'élaboration sur les caractéristiques  
thermomécaniques de composites à matrice thermodurcissable. in Comptes rendus des JNC11,  
Publiés par J. Lamon & D. Baptiste. Arcachon 18-20 novembre 1998. 1: p. 37-45.



MERCI pour votre ATTENTION