

MSE 340- 2026

Principes de mise en œuvre Partie II: Théorie et pratique

veronique.michaud@epfl.ch

Laboratory for Processing of Advanced Composites (LPAC)
Institut des matériaux (IMX)
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL),
CH-1015 Lausanne

Rappel: Plan des 3 cours sur la mise en œuvre

- 1- Exemples des différents procédés de mise en œuvre qui existent, comment les classer et les sélectionner pour quelle application?
- 2- Phénomènes physiques lors de la mise en œuvre, comment modéliser la cinétique de mise en œuvre?
- 3- Exemples et exercices d'application, quelques mots sur le recyclage des composites

Mise en œuvre des composites

Beaucoup de méthodes de mise en œuvre existent, que l'on peut choisir en fonction du coût, du nombre de pièces, de la complexité de la forme, du type de fibres (longues versus courtes), etc.

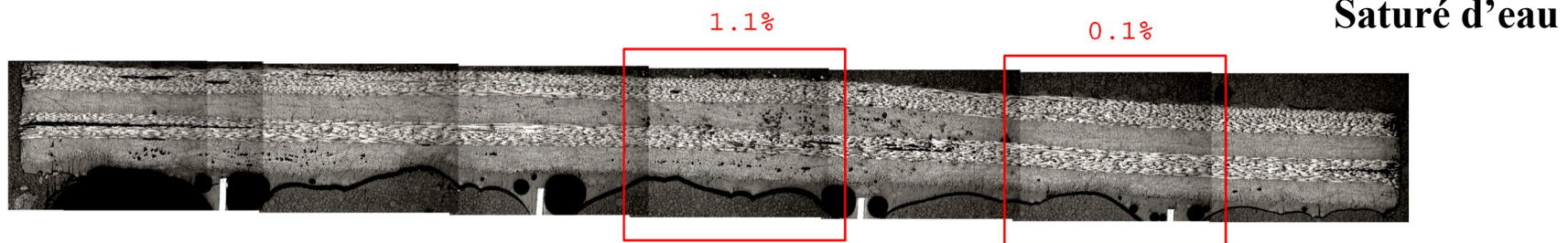
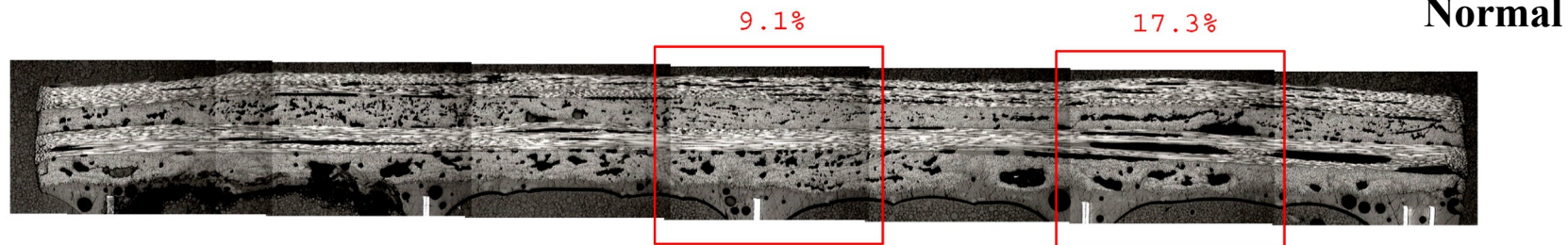
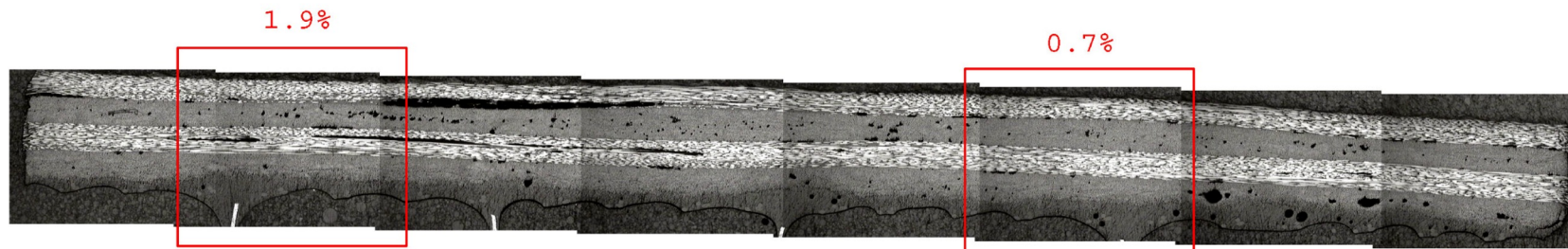
En outre, la mise en œuvre doit assurer:

- de préserver l'intégrité du renfort et son orientation si nécessaire
- de fournir une matrice qui entre en contact intime avec le renfort, développe les propriétés mécaniques désirées, et présente peu de défauts.
- d'être la moins chère possible, et la plus rapide possible pour un cahier des charges donné; si possible de ne pas avoir un impact environnemental trop important, et d'assurer un recyclage possible.

Comment optimiser la mise en œuvre une fois choisie, comment modéliser, comment évaluer le temps de cycle?

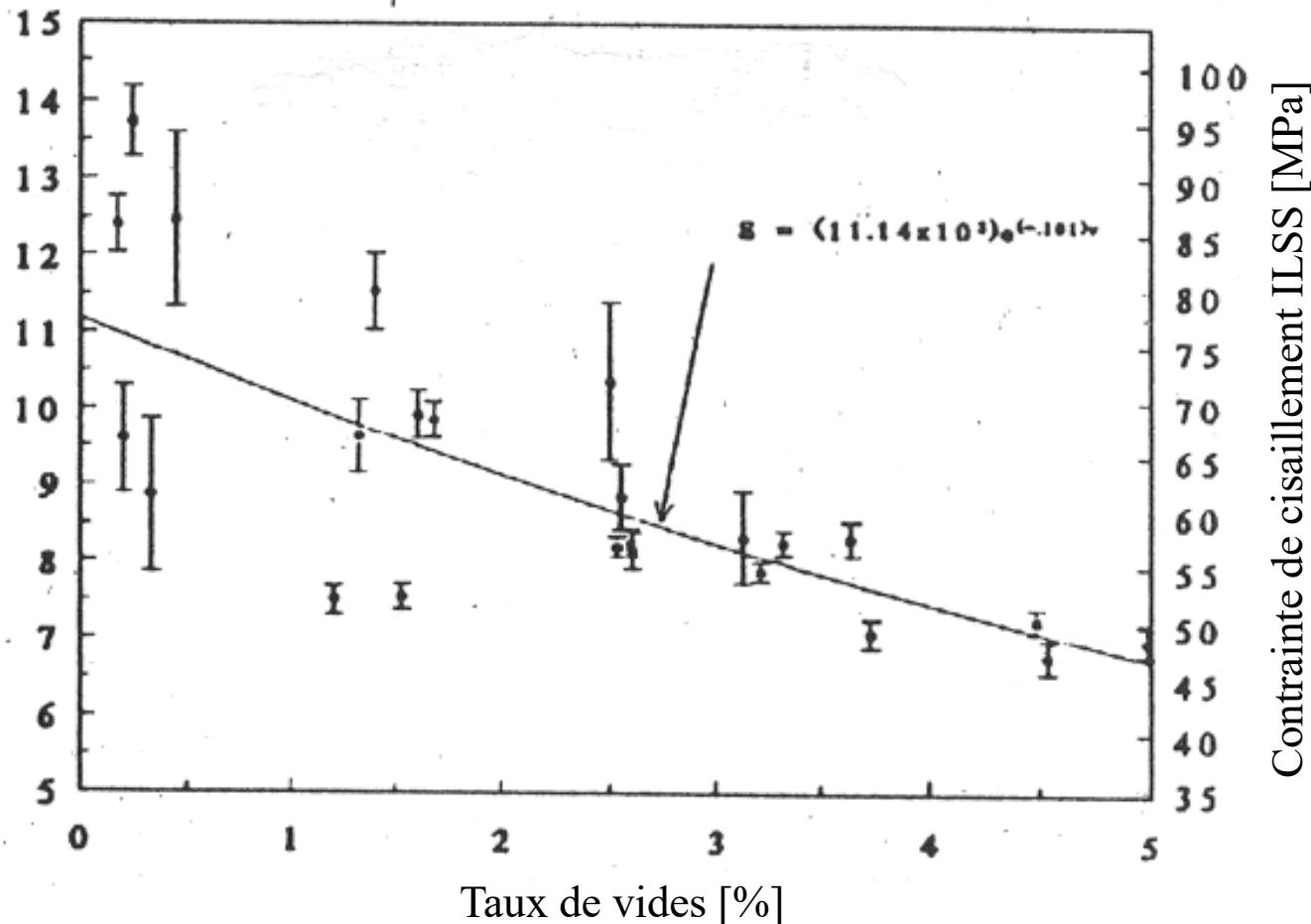
Exemple d'influence de la mise en œuvre

Exemples: prepreg carbone-epoxy cuit sous bâche à vide à 120° C.



Séché sous vide, 24h à 30° C

Influence des porosités sur les propriétés



Cisaillement interlaminaire
Chute 9.7% par 1% de vide

Résistance en flexion
Chute 10.3% par 1% de vide

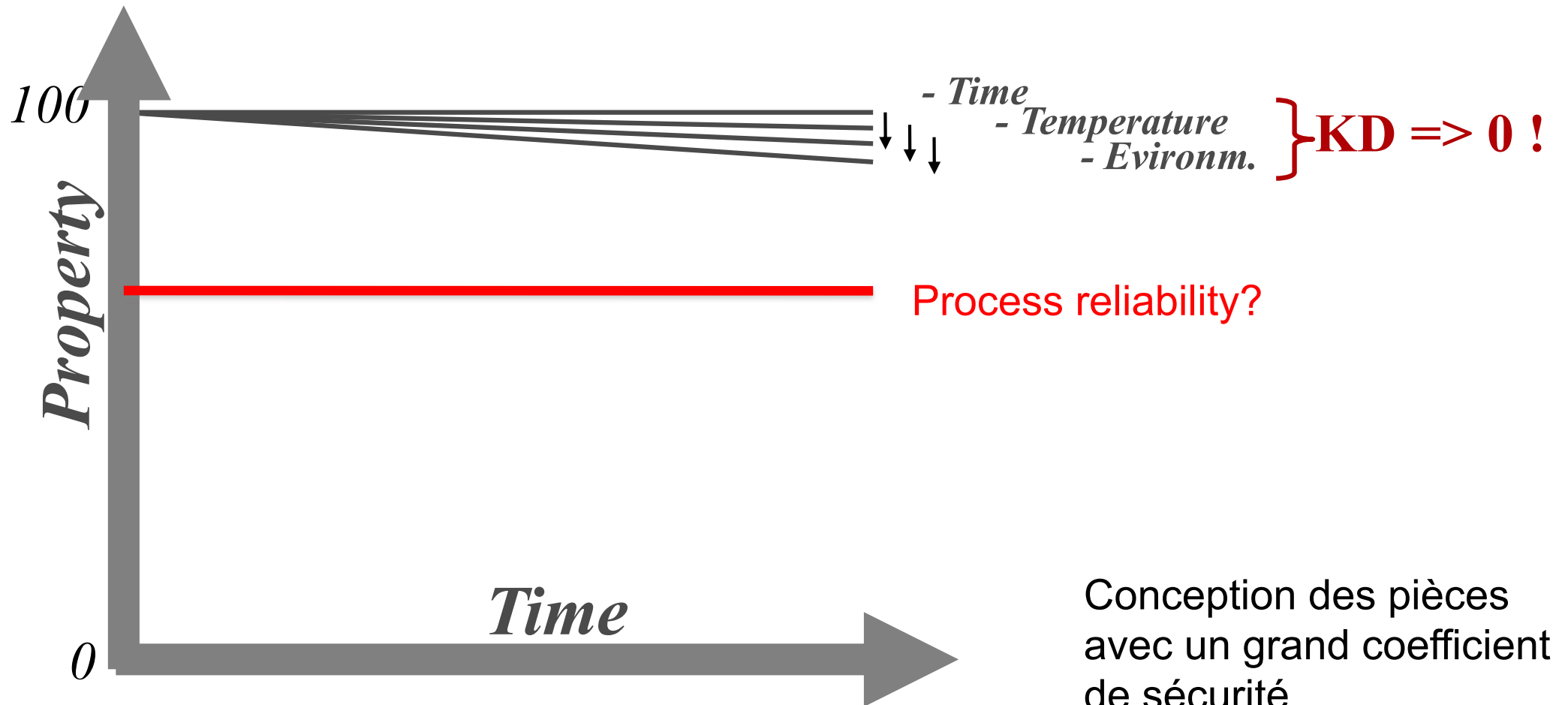
Module en flexion
Chute 5.3% par 1% de vide

Conséquences...valeurs de calculs surestimées...

Nécessité de prendre des coefficients de sécurité, qui tiennent comptes des aléas de la mise en œuvre, des variabilités du matériau...



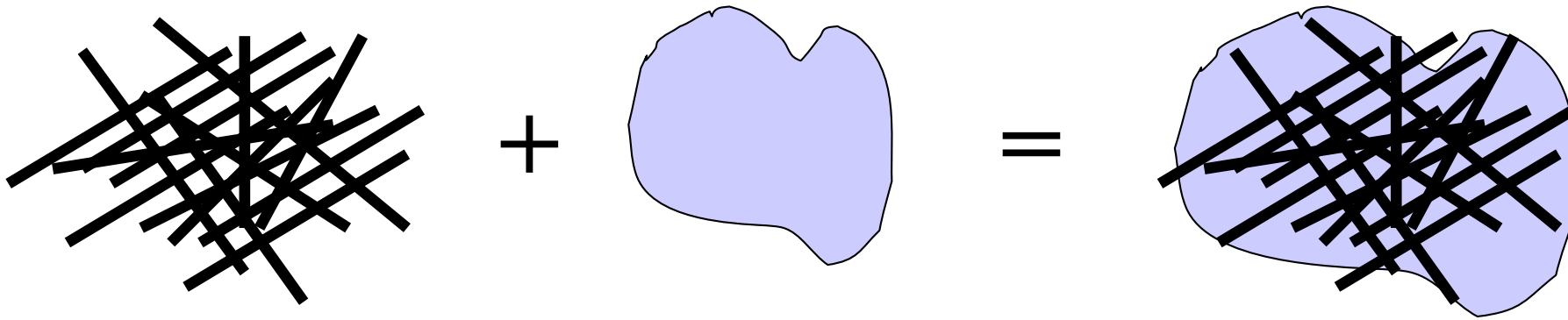
The knock-down factor



Conception des pièces
avec un grand coefficient
de sécurité

- Augmentation du poids
- Augmentation du coût

Quels sont les phénomènes physiques lors de la mise en œuvre d'un composite ?



Renfort: milieu poreux

Matrice: fluide visqueux (visco-élastique)

Interface: thermodynamique, possibilité de réactions chimiques

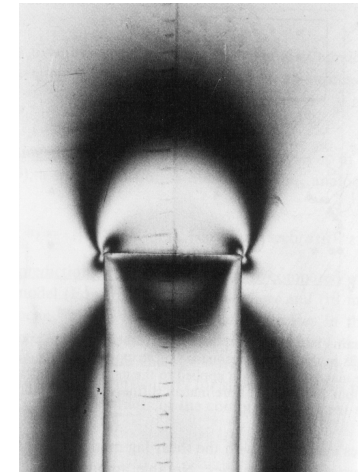
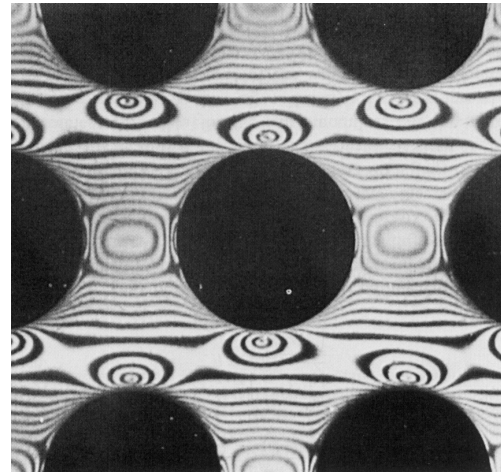
->Phénomènes: mouillabilité, écoulement de fluide à travers un milieu poreux potentiellement compressible, transferts de chaleur, réticulation de la résine (si thermodurcissable), solidification (si TP semi-cristallin), réactions à l'interface...

Les matrices polymères

Rôle de la matrice: assurer le transfert et la répartition des charges (contraintes) entre les fibres

• Matrice idéale:

- Faible viscosité (pour imprégner facilement les fibres)
- Propriétés mécaniques élevées
- Bonne résistance thermique
- Bonne résistance chimique et à l'humidité
- Adhésion élevée aux fibres
- Faible retrait à la mise en œuvre
- Résistance au feu et à l'émission des gaz toxiques
- Bas prix

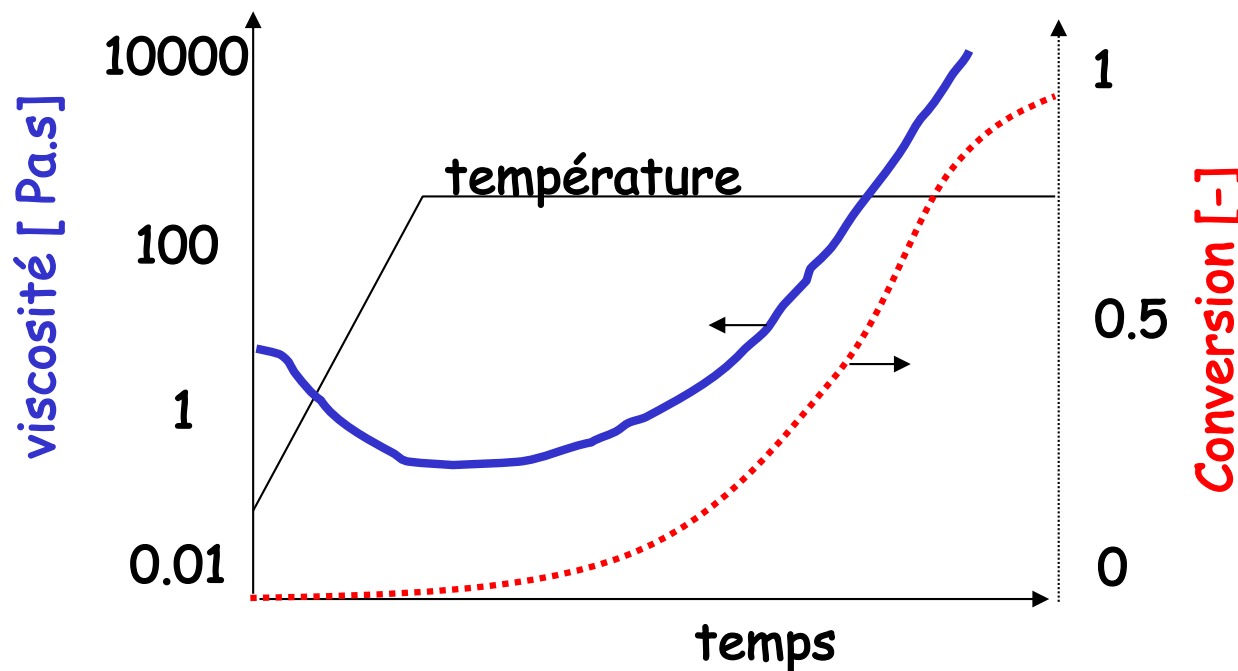


Visualisation des isochromes (lignes d'isocontraintes) dans une matrice polymère enrobant des fibres

Deux choix principaux: thermodurcissables (réticulés) et thermoplastiques (amorphes ou semi-cristallins), éventuellement aussi élastomères (pneus, courroies), ou gels..

Transformation des thermodurcissables

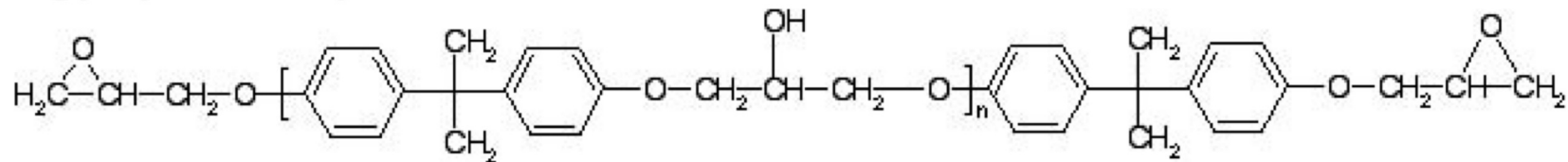
Résine de base en plusieurs composants, monomère et durcisseur, qui réagissent chimiquement pour former des liaisons covalentes, réticulées, jusqu'à former un réseau tridimensionnel (masse molaire infinie).



Transformation des thermodurcissables

Exemple d'une résine époxy, avec un durcisseur anhydride et un accélérateur amine

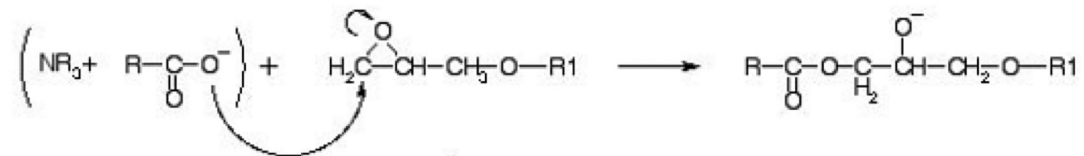
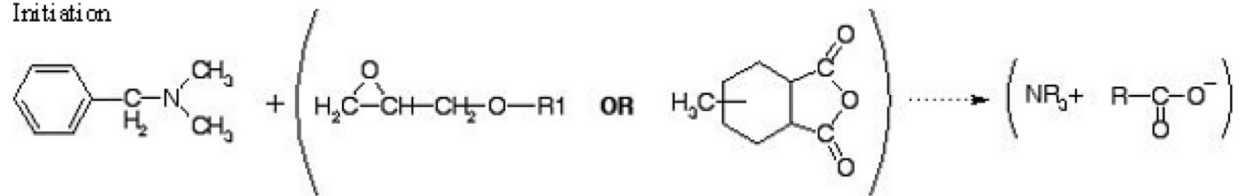
Diglycidyl ether of bisphenol A - DGEBA



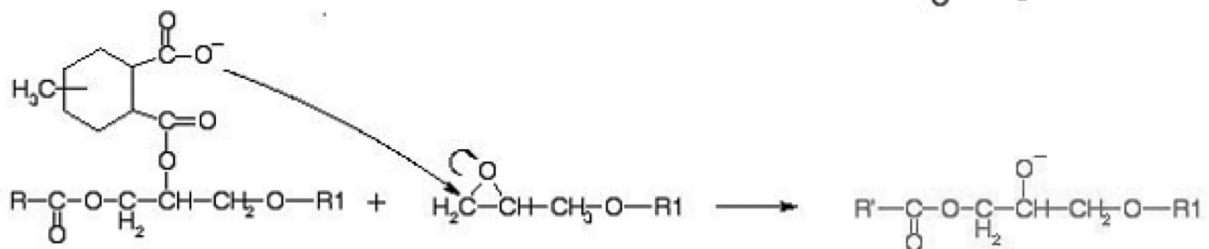
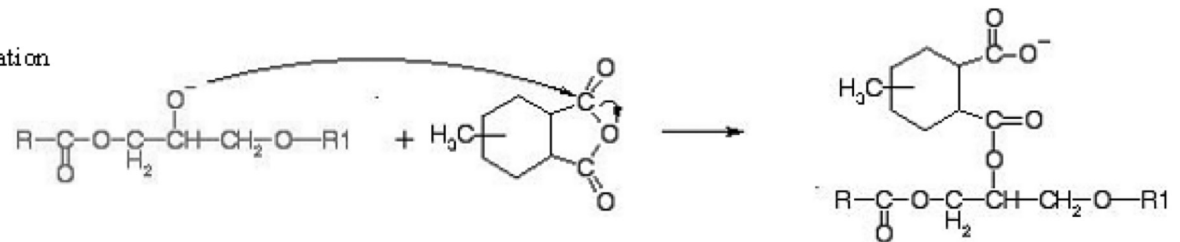
Transformation des thermodurcissables

Réaction chimique:

Initiation



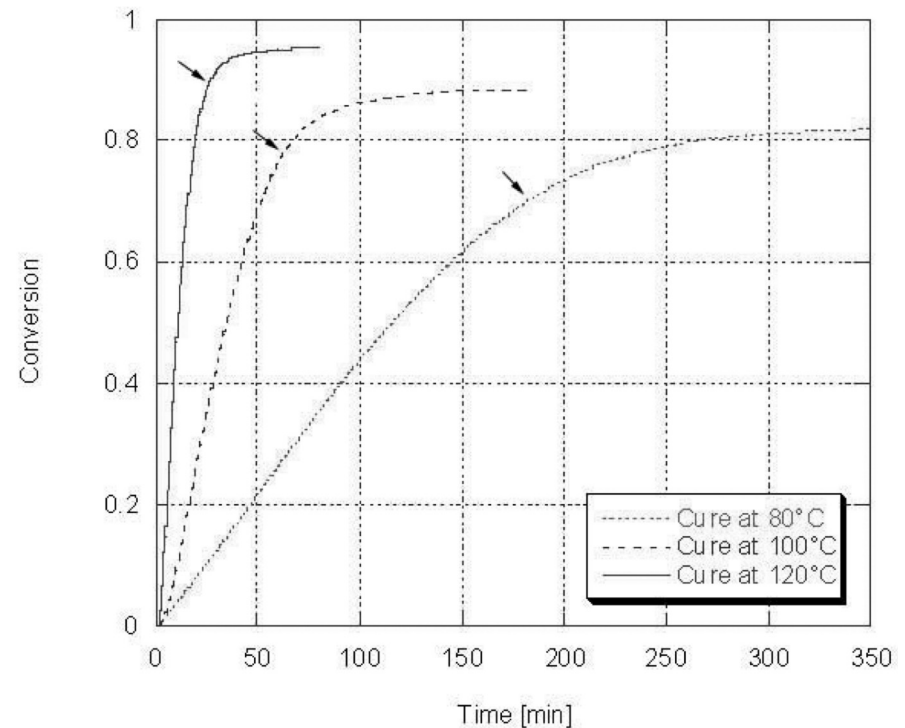
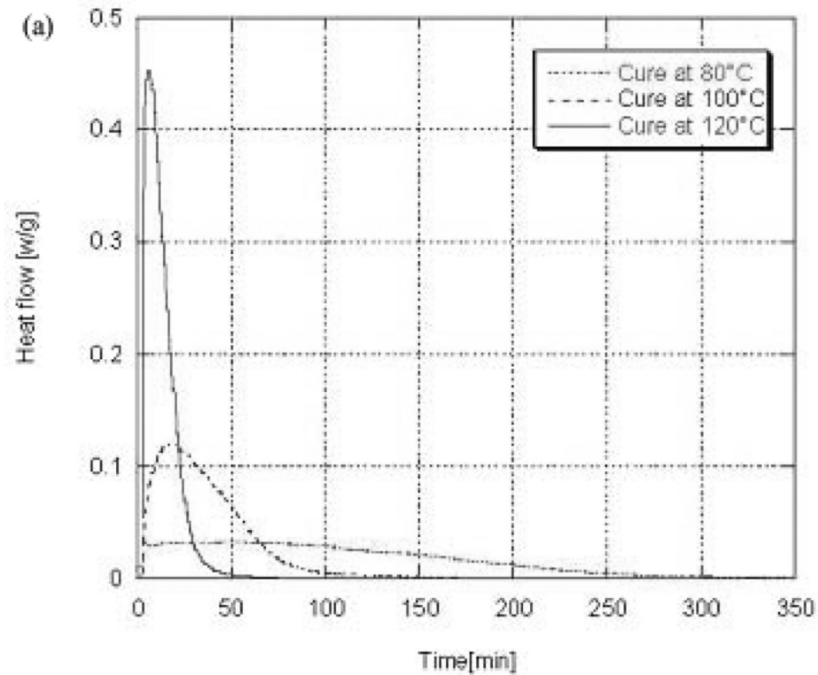
Propagation



Termination

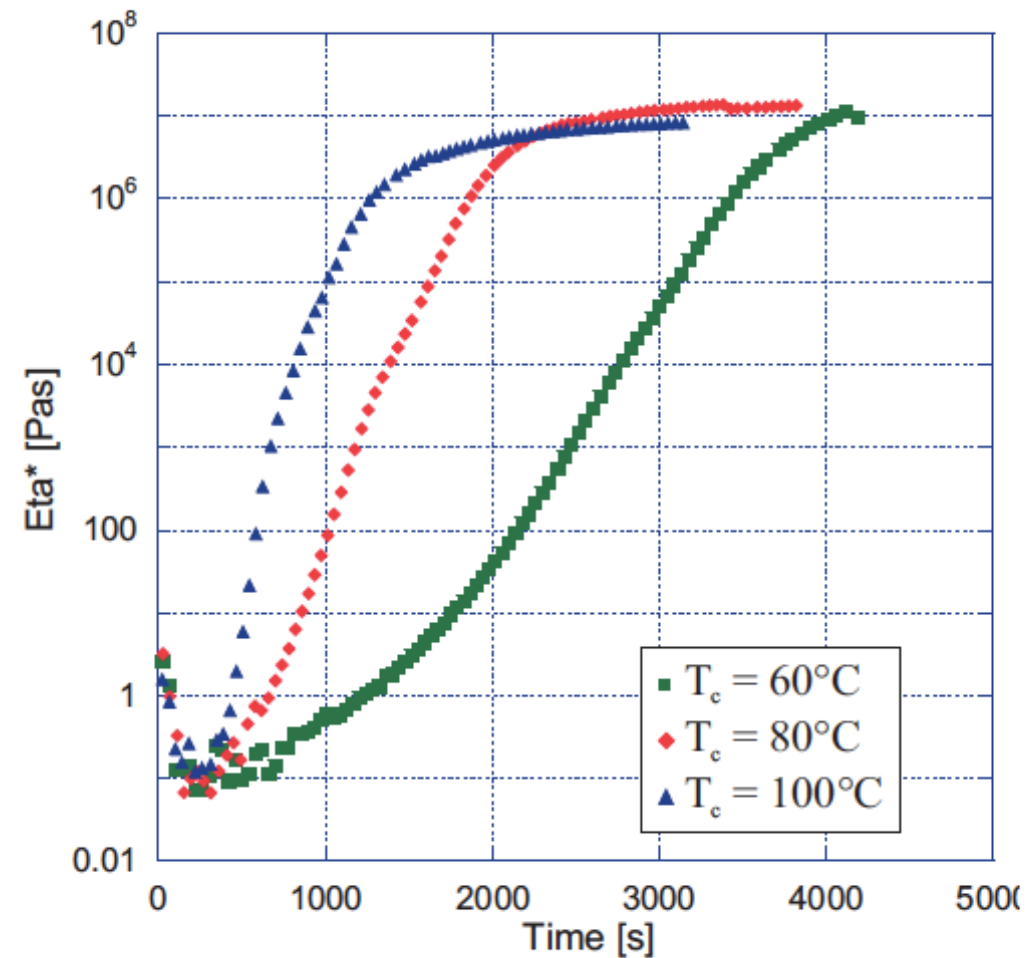
Several terminations could be envisioned such as the formation of an ammonium ion or a transfer reaction as suggested by Steinmann [15].

Transformation des thermodurcissables



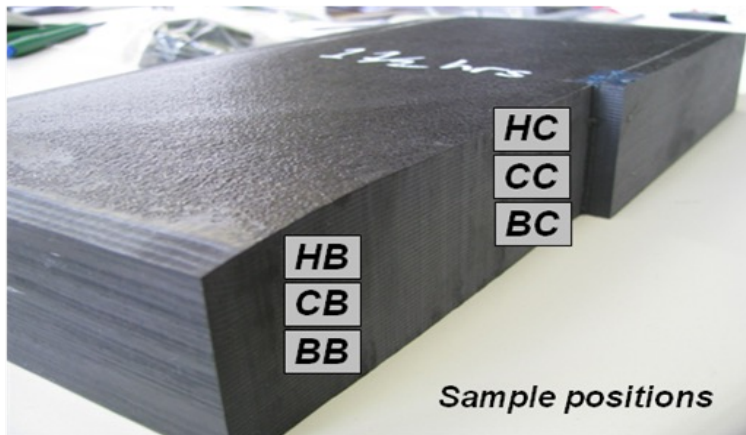
Chaleur de réaction dégagée, taux de conversion: $\alpha = \frac{\Delta H(t)}{\Delta H_{Tot}}$

Evolution de la viscosité

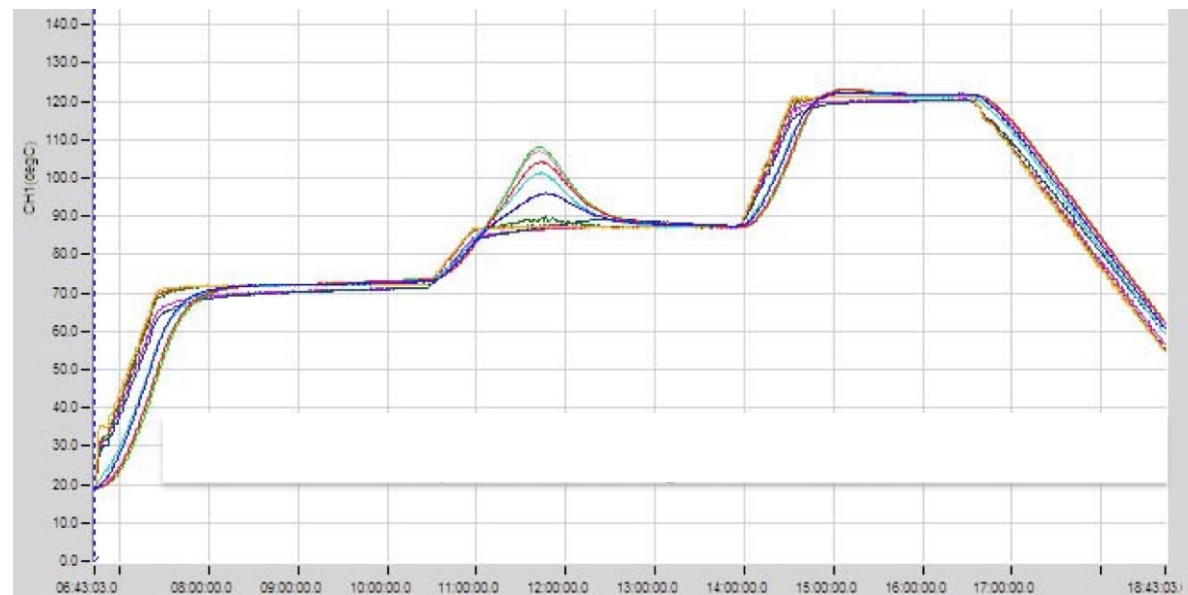


(pour une autre résine)

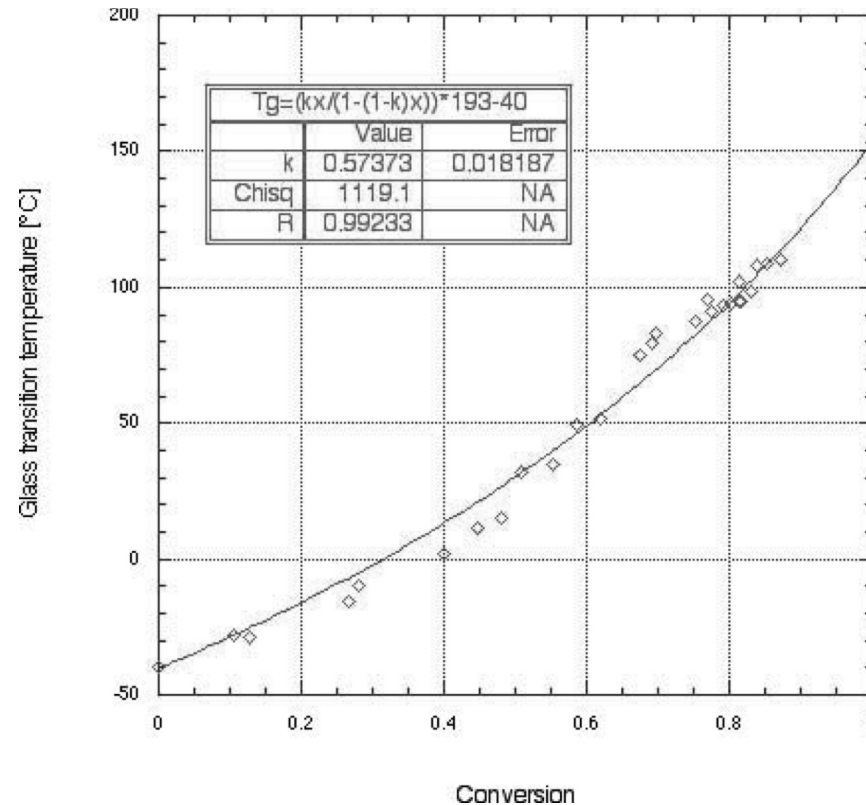
Contrôle de la réaction exothermique



Sur des échantillons épais, la réaction peut entraîner un échauffement au milieu de la pièce, conduisant à des différences de propriétés: T_g plus élevée, dégradation, contraintes résiduelles thermiques.



Evolution de la Tg avec la conversion



Tg, la température de transition vitreuse, évolue avec la conversion

Carte des états en fct de T et t

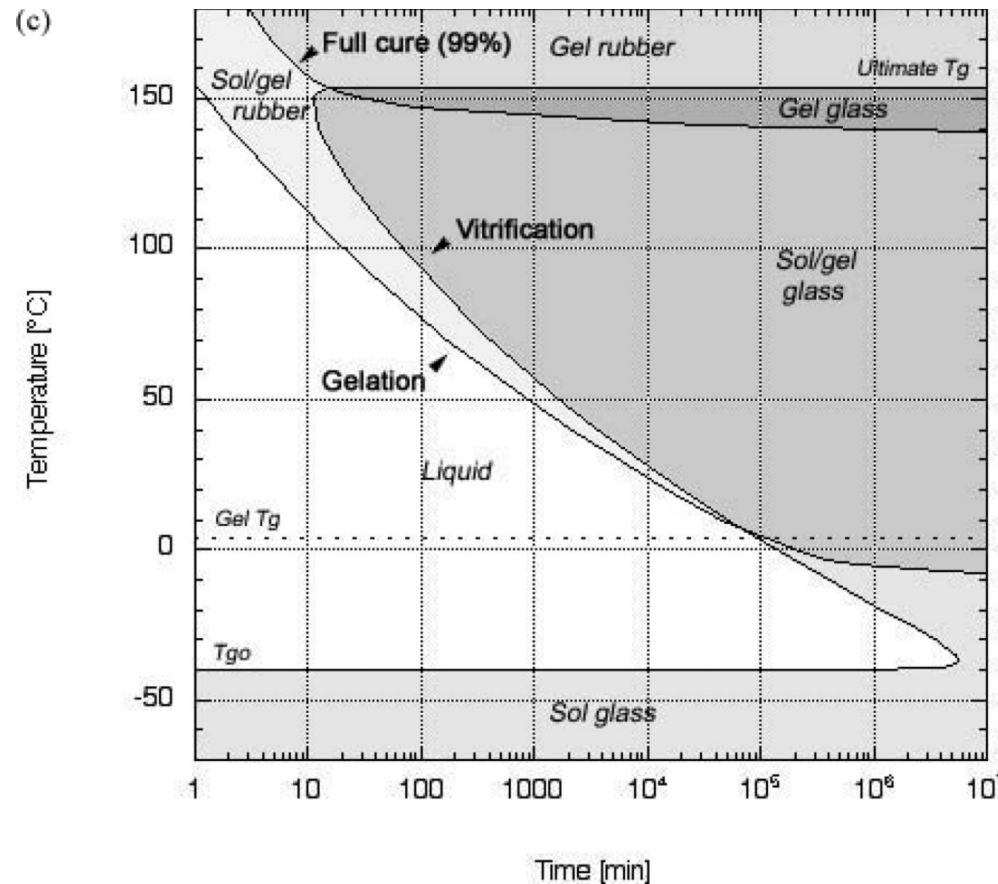


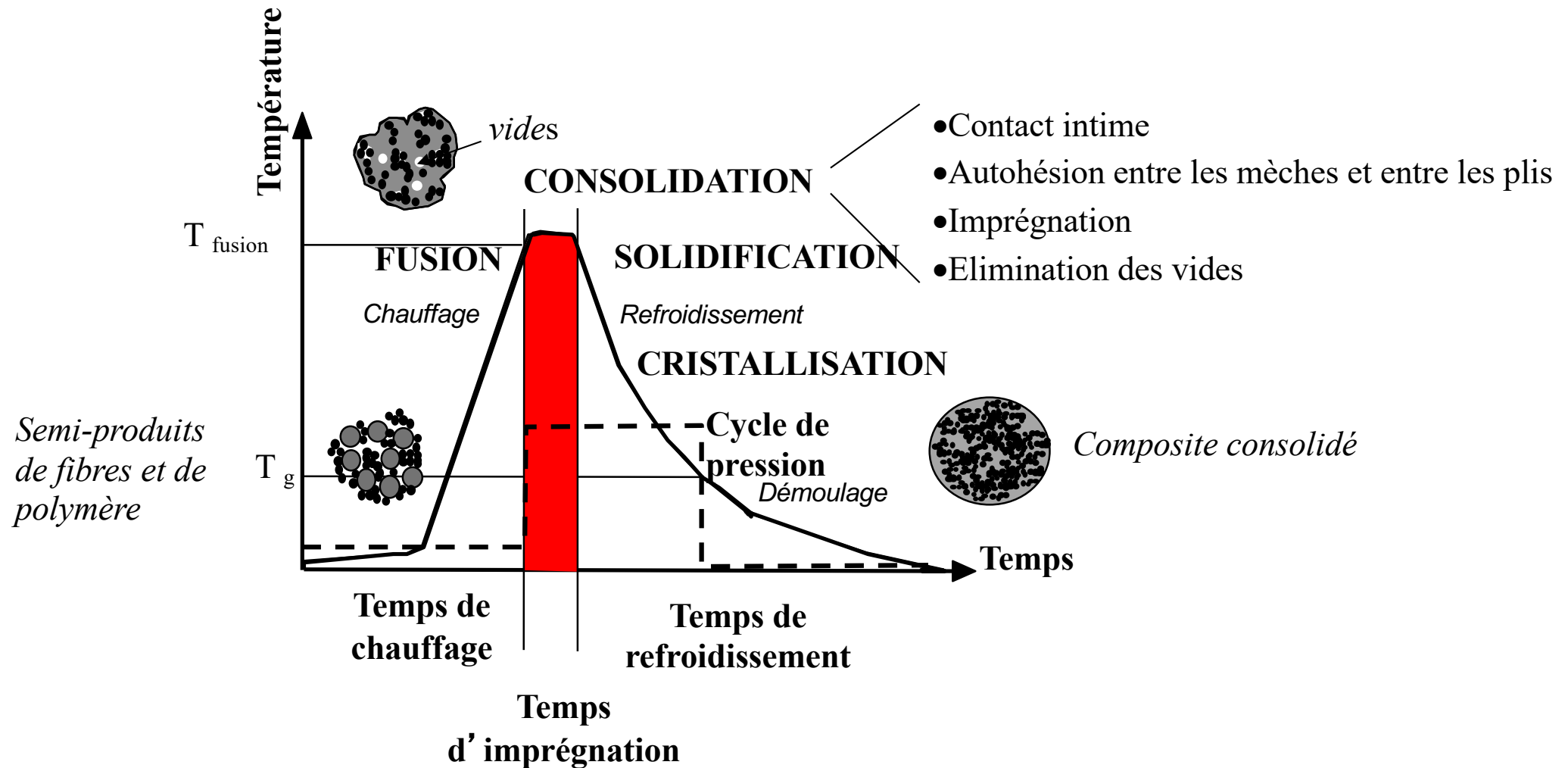
Diagramme TTT de la résine considérée

Transformation des thermodurcissables

Conséquences pratiques pour la mise en œuvre:

- conservation en plusieurs pots séparés, mélange au moment de la mise en œuvre, ou conservation du mélange à basse T.
- au point de gel, la viscosité augmente brutalement: limite d'écoulement, temps d'imprégnation limité.
- il faut démouler quand la pièce a atteint la T_g
- possibilité de faire en plusieurs étapes (B-stage, cuisson, post-cuisson) tant que toute la réaction n'est pas finie.
- Exothermie: problème pour les pièces massives, limitation des rampes de chauffe, risques d'explosion du mélange.
- retrait de polymérisation (5 à 10%)
- produits réactifs dangereux: styrène, amines, ...et volatils!

Transformation des thermoplastiques

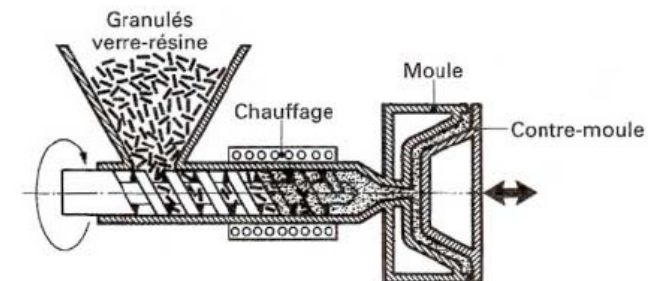
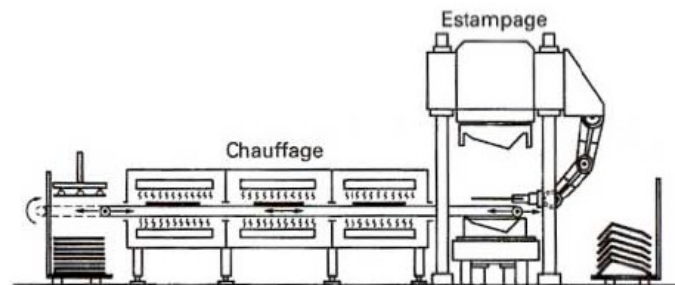
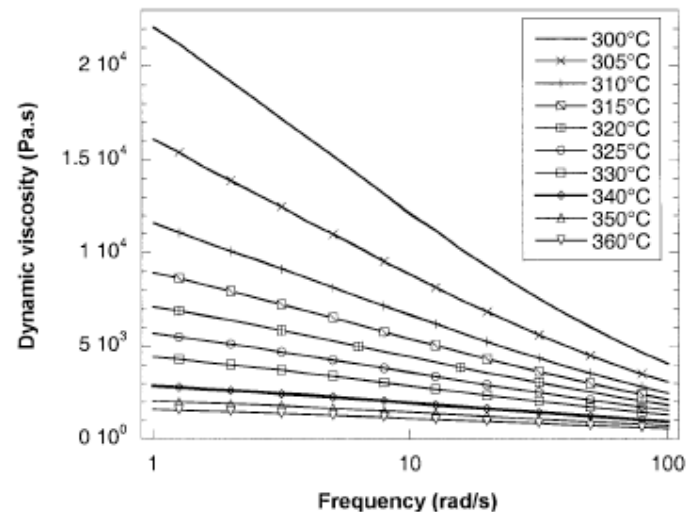


Exemple des comelés : fibre de polymère, et fibre de renfort, vu en TP

Transformation des thermoplastiques

Evolution de la viscosité avec le temps et la température
Exemple du PEI

- Viscosité dépend de
masse moléculaire,
de la linéarité...et
de la température!



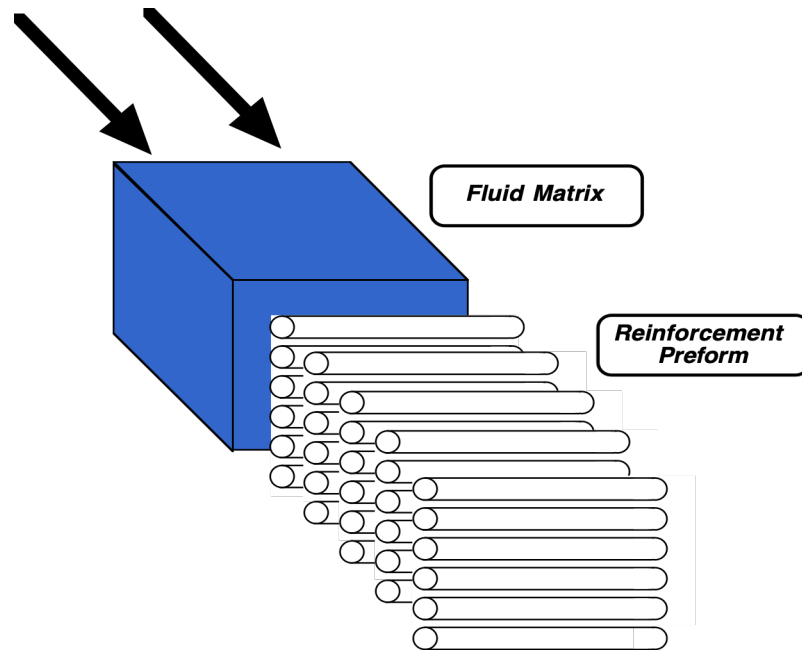
Transformation des thermoplastiques

Conséquences pratiques pour la mise en œuvre:

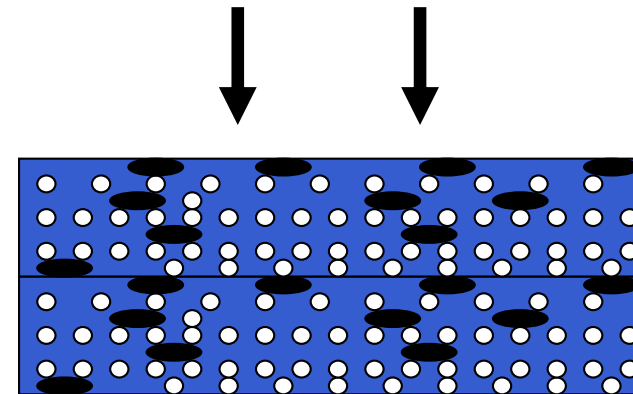
- pas de problèmes de chimie, éventuellement dégradation.
- possibilité de chauffer et refroidir plusieurs fois, mettre en forme, post-former, etc..
- en général, la température de mise en œuvre doit être au dessus de T_m ou T_g , donc au dessus de la température d'utilisation!
- la viscosité est élevée...solvents?
- retrait de cristallisation (peut aller jusqu'à 30%!)...
solidifier sous pression?

Modélisation des procédés

- Dans tous les procédés de fabrication des composites, les phénomènes sont ceux de l'écoulement d'un ou plusieurs fluides dans un milieu poreux, potentiellement compressible, avec potentiellement des transferts de chaleur.
- 2 cas principaux, en plus de l'écoulement d'une suspension chargée, plus proche de la plasturgie traditionnelle.



Infiltration



Consolidation, avec ou sans écoulement

Pourquoi modéliser?

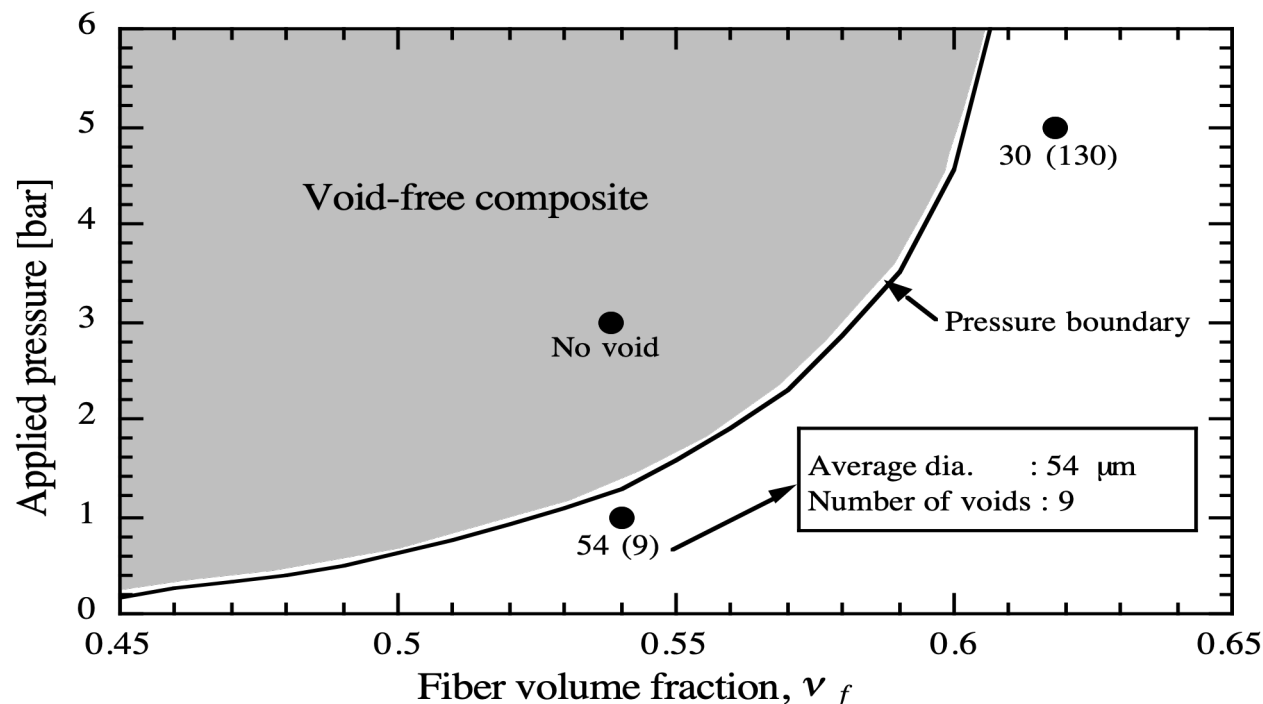
On cherche à optimiser la mise en œuvre:
Qualité, cadence, coût, etc....

Nécessité d'établir une « fenêtre de mise en œuvre »

Carte des paramètres possibles, P , T , vitesse de refroidissement, V_f , etc...

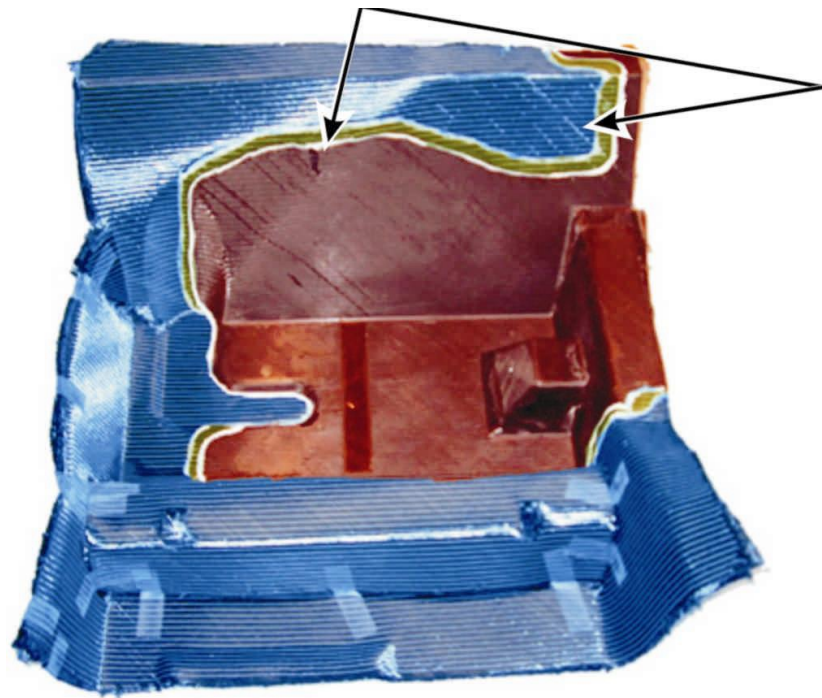
Exemple:

Mise en œuvre de preimprégnés, zone de fabrication de composites « sains » pour un prepreg donné.



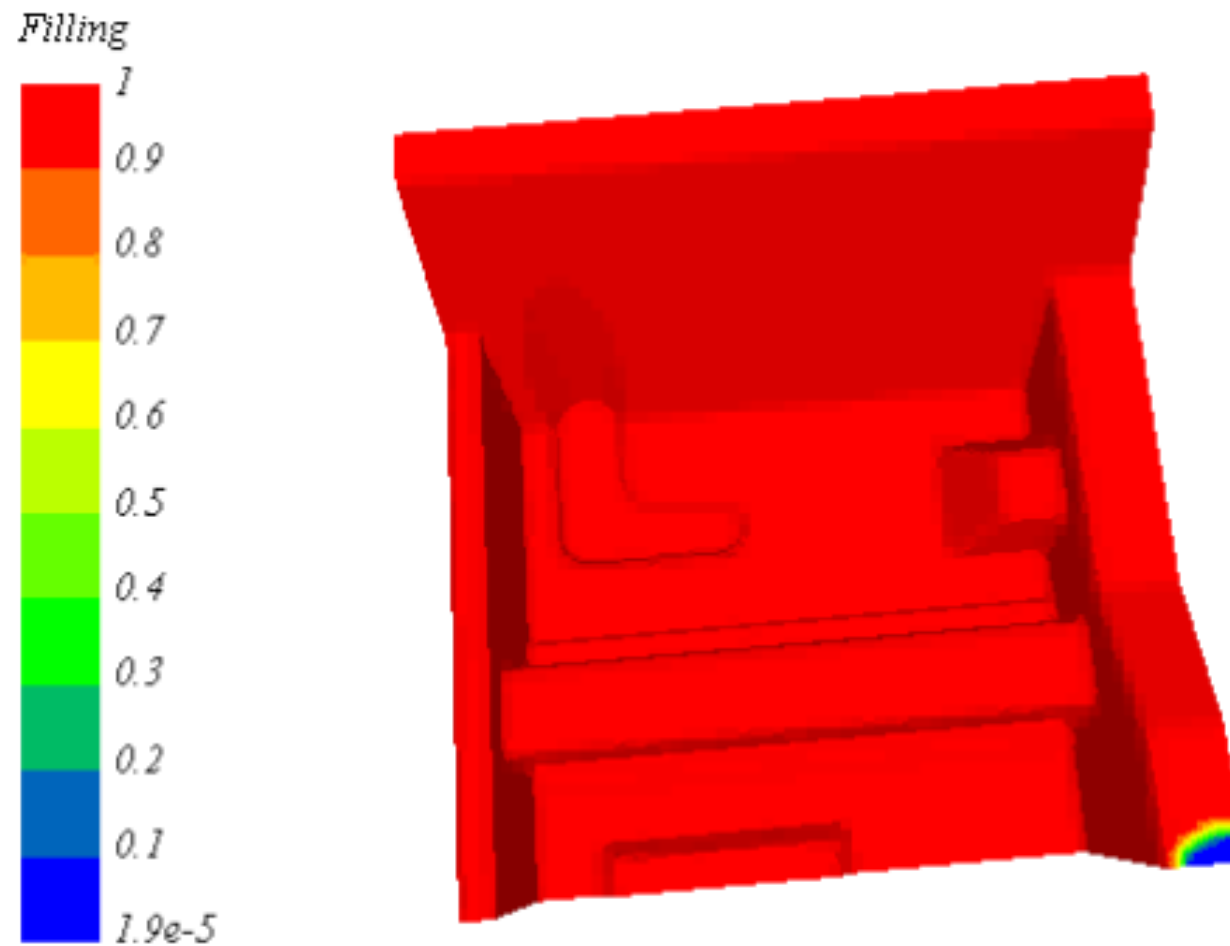
Pourquoi modéliser?

Exemple: RTM, on veut faire une pièce un peu complexe...
Où mettre l'entrée, les évents?



Un exemple de simulation de remplissage

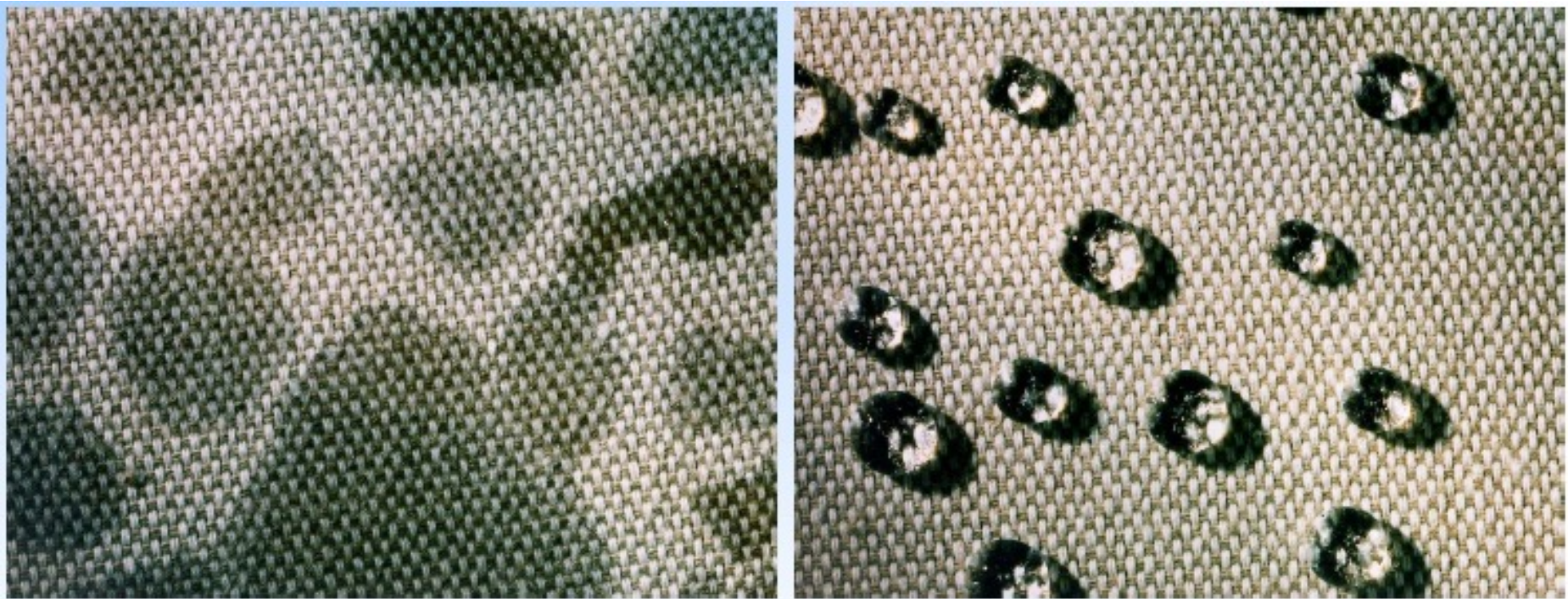
-Exemple of PAM-RTM (ESI)



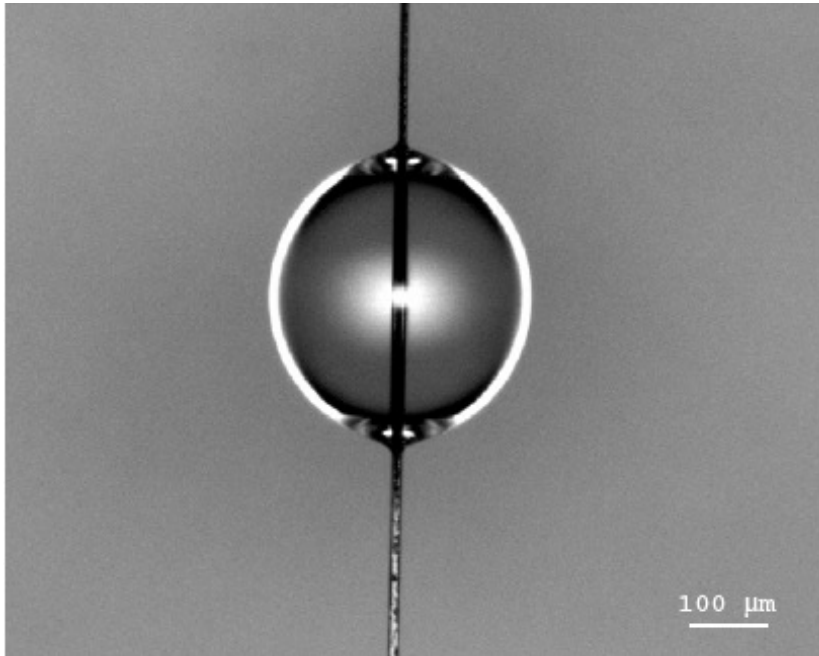
Time : 217924996431872 s.

Modélisation de l'interaction fibre-résine

-Première question: est-ce que la résine rentre spontanément dans le lit de fibres?



Mouillabilité/adhésion

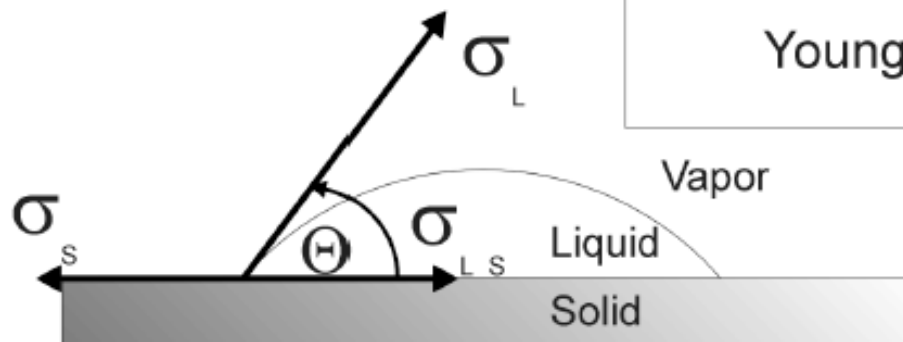


Résine époxy sur fibre de carbone

- Mesures sur une fibre avec une goutte de résine: angle de contact
- Notion de pression capillaire
- Création d'interface, mécanismes d'adhésion

Equilibre des forces surfaciques

Sessile Drop
Method



$$\cos \Theta = \frac{\sigma_s - \sigma_{Ls}}{\sigma_L}$$

Young's Equation

σ_L = surface tension of liquid

σ_s = surface free energy of solid

σ_{Ls} = interfacial tension between liquid and solid

θ = contact angle

Mesure des angles de contact dynamiques

$$\cos \theta = \frac{F}{L \cdot \sigma}$$

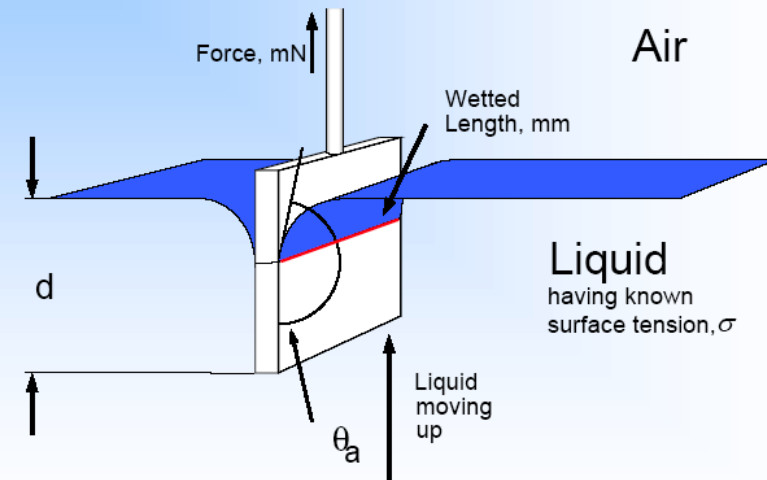
θ = Contact Angle

F = Wetting Force

L = Wetted Length

σ = Surface Tension

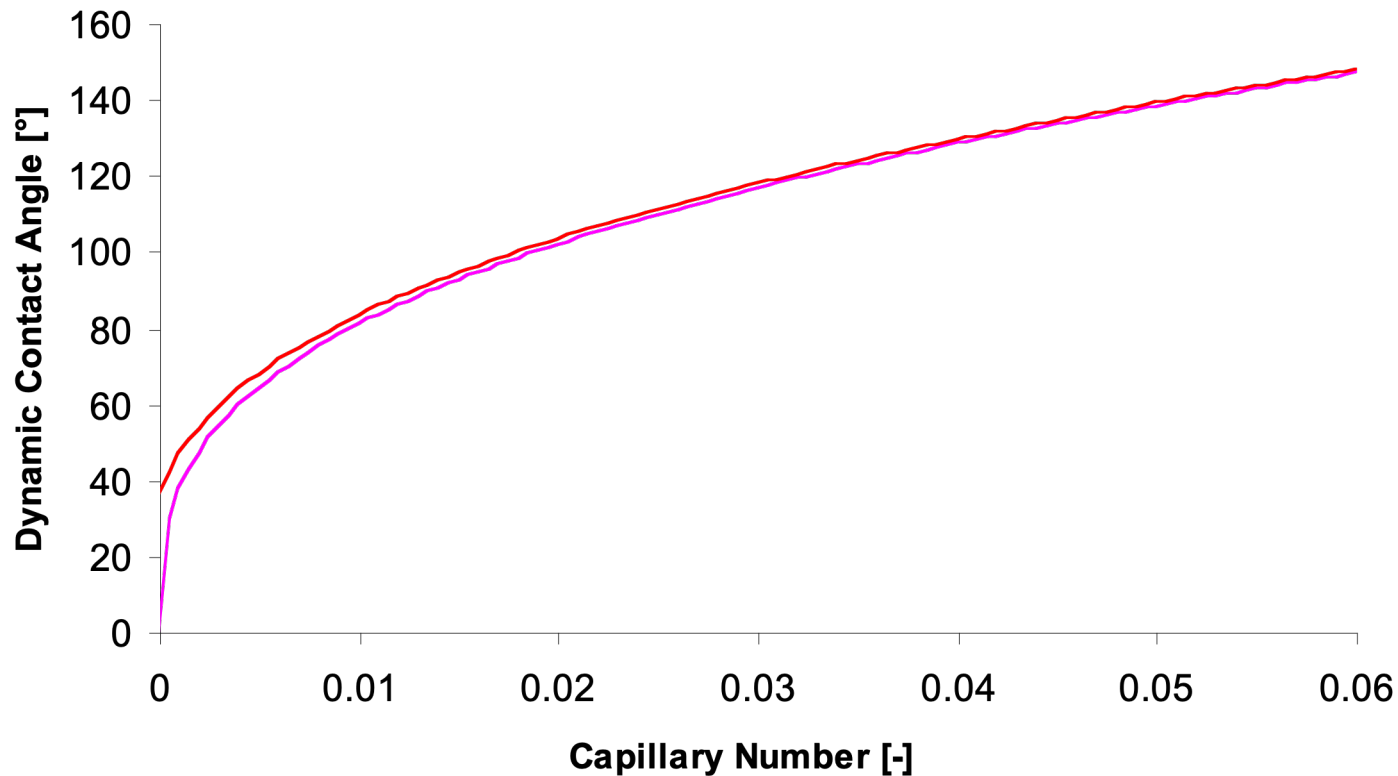
Advancing Contact Angle - Wilhelmy Method



Cet angle varie avec la vitesse (loi de Tanner):

$$\theta^3 - \theta_0^3 \cong c_T \cdot Ca \quad \text{où } Ca \text{ est le nombre capillaire} \quad Ca = \frac{u_l \cdot \eta}{\sigma_L}$$

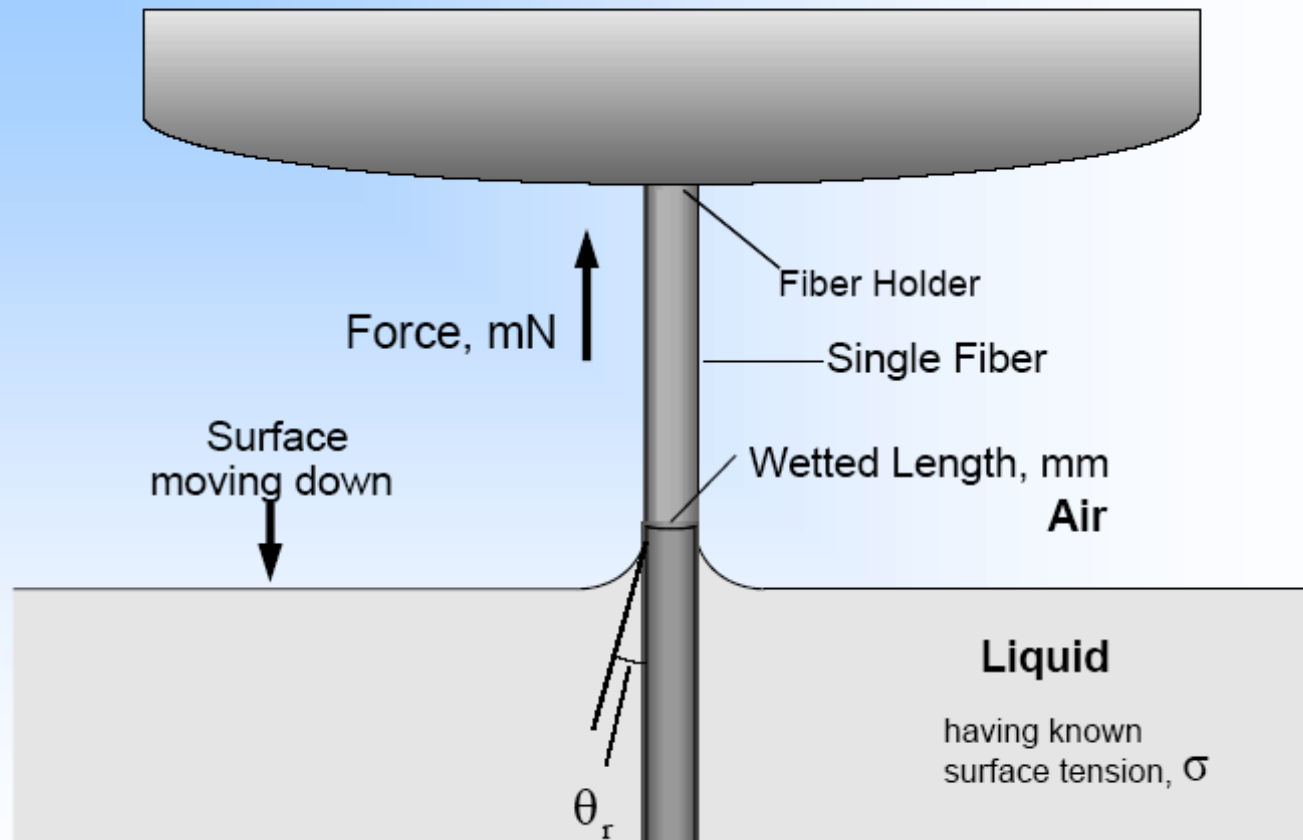
Mesure des angles de contact dynamiques



Exemple pour
une résine
époxy infiltrant
des fibres de
carbone

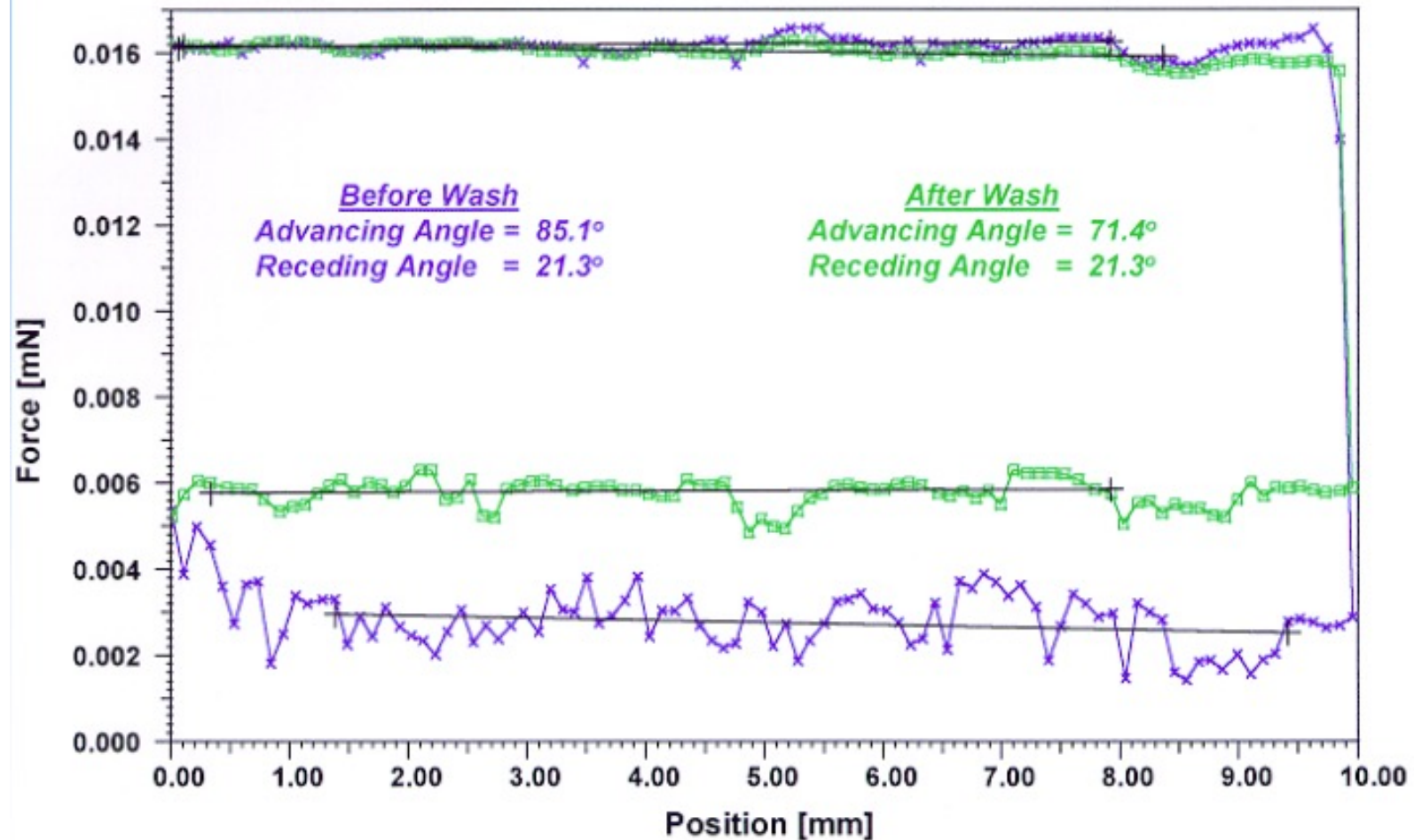
Mesure sur une fibre

Receding Contact Angle, Single Fiber



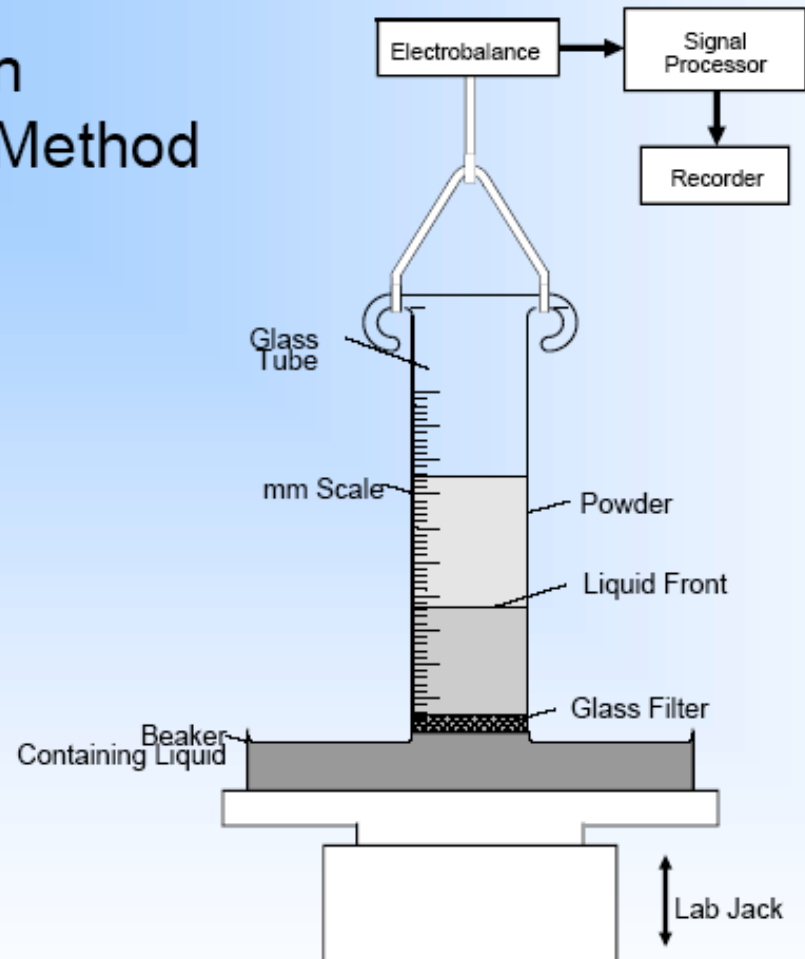
Mesure sur une fibre

Human Hair Before and After Washing with 1% Aqueous SDS



Mesure sur des poudres

Washburn Sorptions Method



Mesure sur des poudres

Contact Angles of Porous Solids

$$\cos\Theta = \frac{m^2}{t} \frac{\eta}{\rho^2 \sigma_L c}$$

η = liquid viscosity [mPas]

σ_L = liquid surface tension [mN/m]

ρ = liquid density [g/cm³]

Θ = contact angle liquid / powder

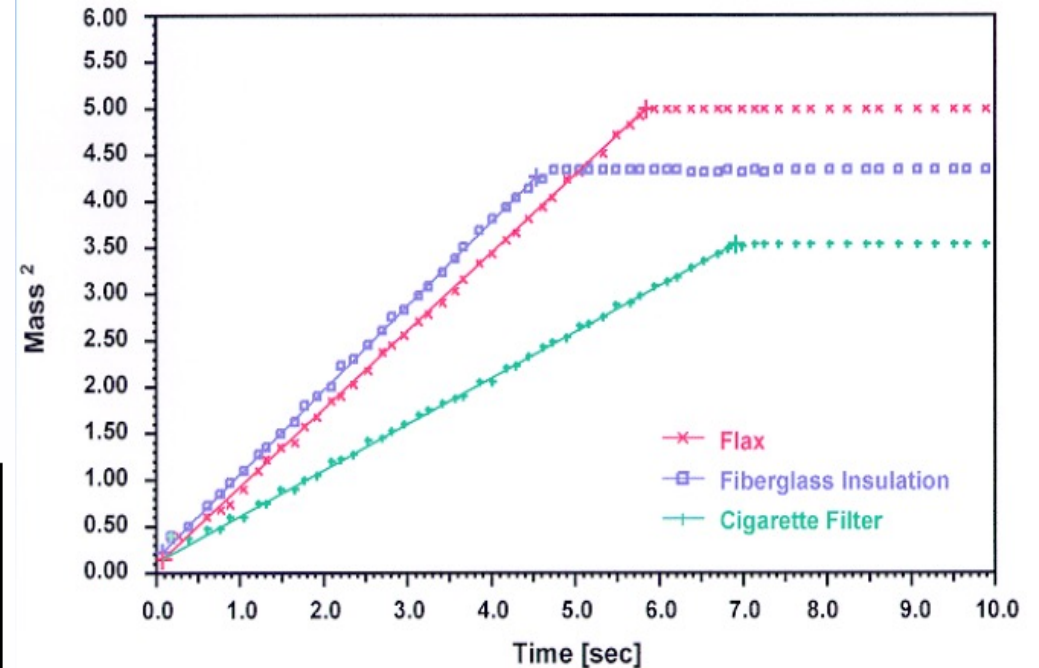
c = factor depending on powder and sample-holder geometry

$c = \frac{1}{2} \pi^2 r^5 n_k^2$ with r = capillary radius and n_k = number of capillaries

m = weight [g]

t = time [s]

Water Adsorption onto Various Fibrous Materials



Valeurs de tension de surface

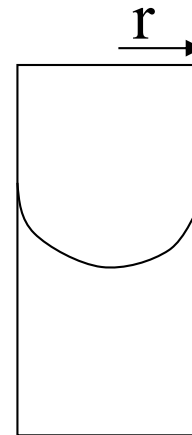
Material	Temperature (°C)	Surface Tension (N/m)
Polypropylene (PP)	180	0.0208
Polyethylene (PE)	180	0.0265
Polyethylene oxide (PEO)	180	0.0307
Nylon 6.6	270	0.0303
PEI	220	0.0357
PA 12	-	0.039
Epoxy, unreacted	-	0.03 to 0.04
Ethanol	20	0.022
Water	20	0.073
SiO ₂	1800	0.31
Na ₂ SiO ₃	1088	0.30
Al ₂ O ₃	2050	0.63
CaSiO ₃	1540	0.35
Al	700	0.87
Cu	1120	1.2
Ti	1670	1.53
Ag	970	0.92
Au	1070	1.13

Calcul de la pression capillaire

$$\Delta P_{\gamma} = -\gamma_{LV} S_f \cos \theta \quad \text{Où } S_f \text{ est l'aire d'interface par unité de volume de résine}$$

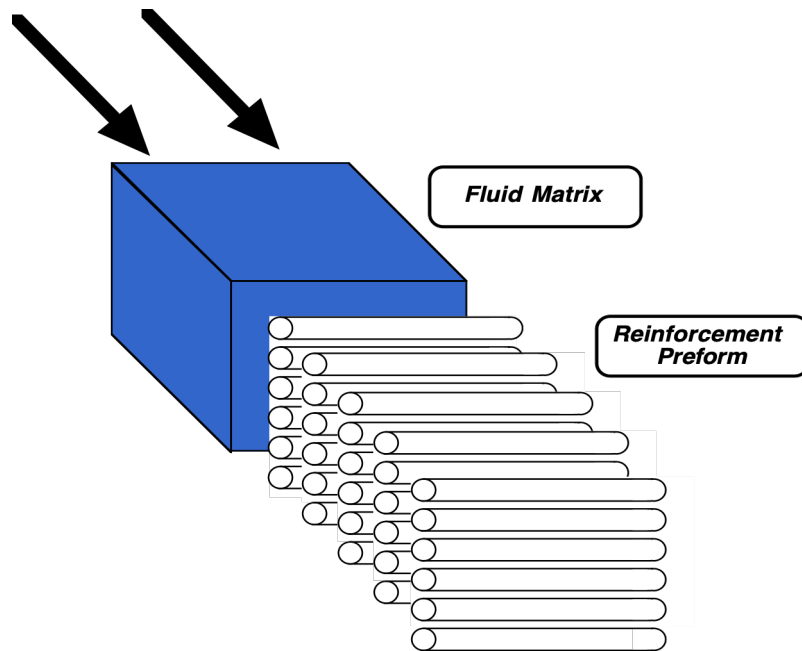
Pour un tube cylindrique:

$$\Delta P_{\gamma} = \frac{-2\gamma_{LV} \cos \theta}{r}$$



Cas de l'infiltration

Seul ce cas est traité dans ce cours, mais les équations sont similaires dans le cas de la consolidation



Modélisation de l'infiltration

- Equations de transport : masse, quantité de mouvement, énergie
- Lois constitutives des paramètres nécessaires:
 - Resine: viscosité, cinétique de cuisson, solidification
 - Lit de fibres: perméabilité, comportement en compression
 - Interaction Resine/fibre : thermodynamique, effets capillaires dynamiques, etc.
- conditions aux limites et initiales: T moule, pression ou débit imposés, etc.
- Validation expérimentale

Approche de la mécanique des milieux continus

Volume élémentaire représentatif

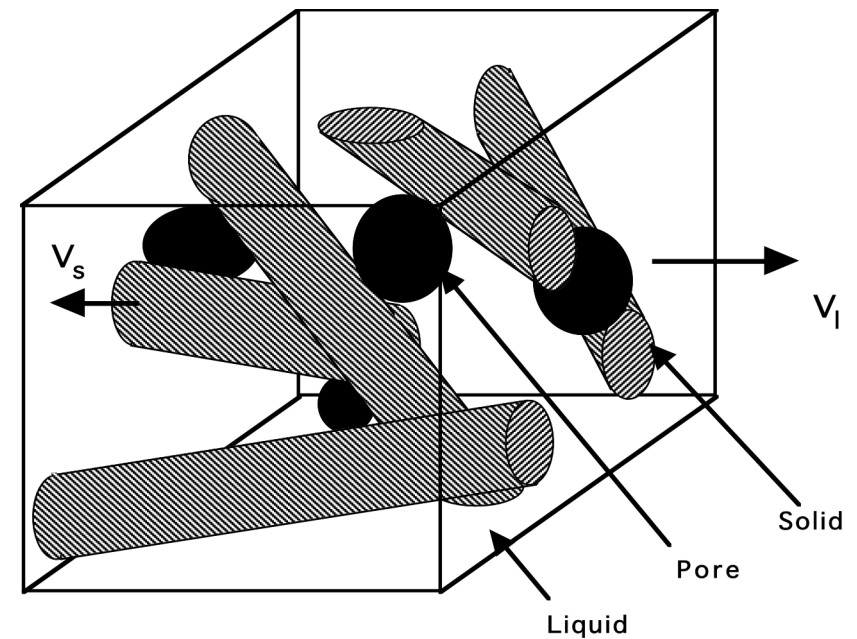
Homogenization technique: volume averaged quantities

$$V_l + V_p + V_f = 1$$

and

$$S = \frac{V_l}{(1 - V_f)}$$

Dans ce cours, on
supposera $S=1$ ou 0 ,
écoulement saturé



Le volume élémentaire représentatif (VER):
Petit à l'échelle de la préforme,
Grand à l'échelle des fibres

Conservation de la matière

Equation générale:

$$\partial_t m_\alpha + \nabla (m_\alpha \cdot v_\alpha) = R_\alpha$$

Phase α

Masse m_α

Vitesse v_α

Taux de production de masse R_α

$$m_\alpha = V_\alpha \rho_\alpha$$

Densité ρ_α

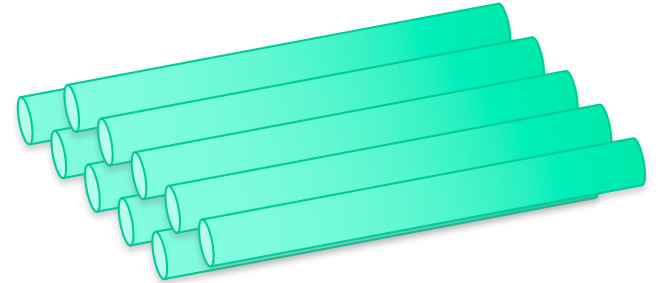
En pratique:

$$\frac{\partial V_\alpha}{\partial t} + \nabla (V_\alpha \cdot v_\alpha) = 0$$

Lois d'écoulement

Navier-stokes equations dans un tube...

$$Q = \left(\frac{-dp/dx}{2\eta} \right) \left(\frac{\pi R^4}{4} \right)$$



Loi de Darcy:

$$\vec{v}_0 = \frac{Q}{A} = -\frac{K}{\eta} \cdot (\nabla P + \rho_m \vec{g} + \vec{f})$$

V_0 vitesse superficielle $= (1 - V_f)v_l$, Q débit volumique, A aire traversée

K permeabilité, η viscosité, P pression, f forces additionnelles

Conservation de l'énergie

En temperature, T: loi de Fourier

$$\nabla(k_c \nabla T) = \rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_l c_l v_l \cdot \nabla T$$

k_c conductivité thermique du composite,

c_c capacité calorifique du composite; c_l de la résine

Vitesse v_l de la résine

Densité de la phase α : ρ_α

Equilibre mécanique

$$\sigma = \sigma' + BSp$$

σ tenseur des contraintes appliquées, σ' tenseur des contraintes effectives (positive in compression), B matrice de Biot, S saturation et p pression locale dans le fluide.
Si isotrope, $B=b \mathbf{I}$, ou :

$$b = 1 - \frac{C_0}{C_s}$$

avec C_0 le module en compression du lit de fibres, et C_s le module intrinsèque de compression de la fibre.

Terzhagi: $b=1$

Equilibre mécanique-en pratique

$$\sigma = \sigma' + Sp \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{pmatrix}$$

En général, on néglige les effets dans les directions x et y du plan

En une dimension

$$\sigma_{zz} = \sigma'_{zz} + Sp$$

Hypothèses usuelles

- phases fluides et solides non compressibles
- écoulement laminaire
- pas de changement de phase pendant l'écoulement (solidification)
- isotherme
- écoulement saturé, renfort parfaitement rigide.

Equations simplifiées, en 1D, écoulement saturé, préforme rigide, isotherme

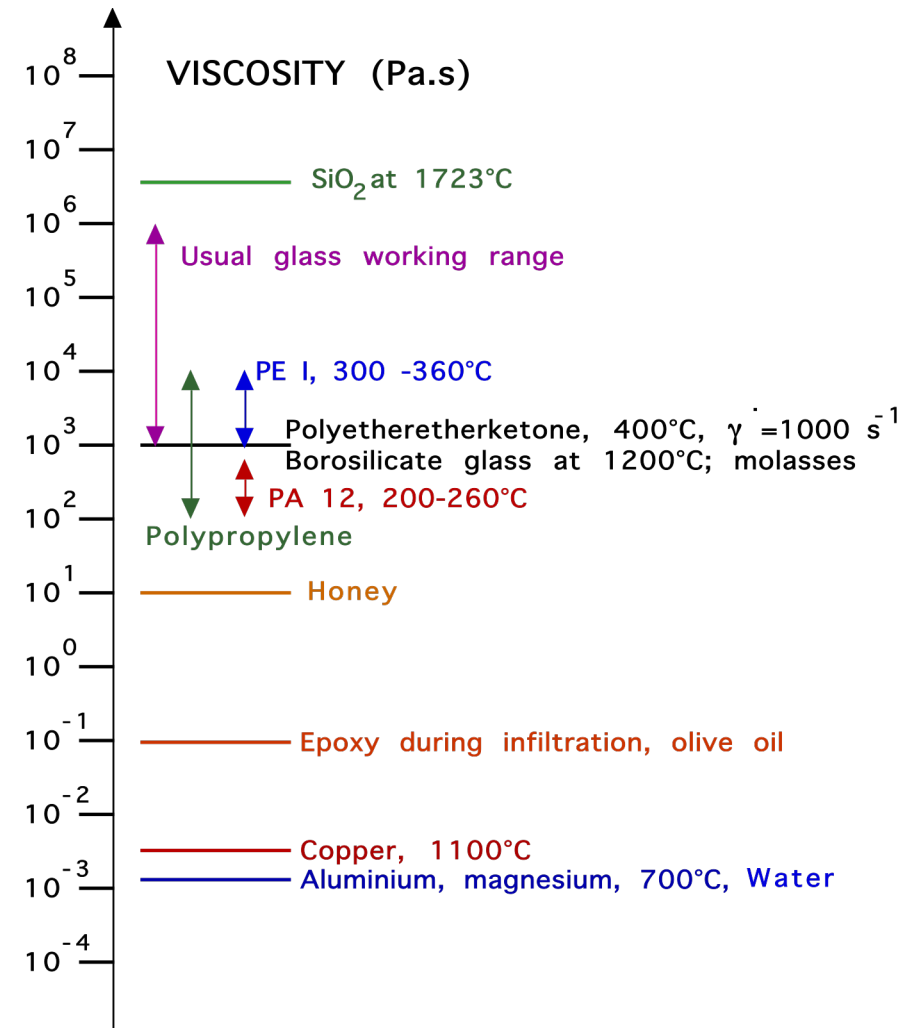
- Conservation matière:
- Loi de Darcy:
- Conservation chaleur:
- Eq. Mécanique:

Conditions aux limites

- Géométrie de la pièce, symétries, etc...
- Température
- Pression ou débit imposés sur la résine
- Pression ou contrainte imposés sur l'ensemble
- pression au front d'infiltration ?

Paramètres nécessaires pour résoudre les équations

Fluide: résine
thermodurcissable
ou thermoplastique,
comportement?



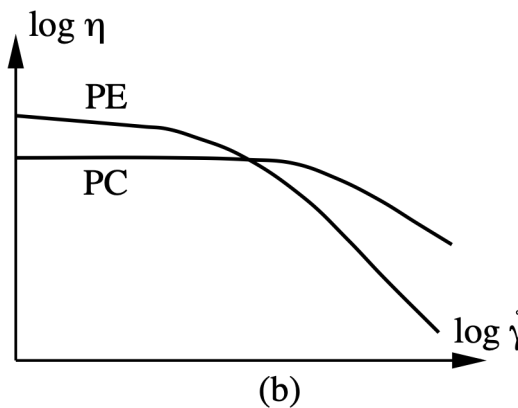
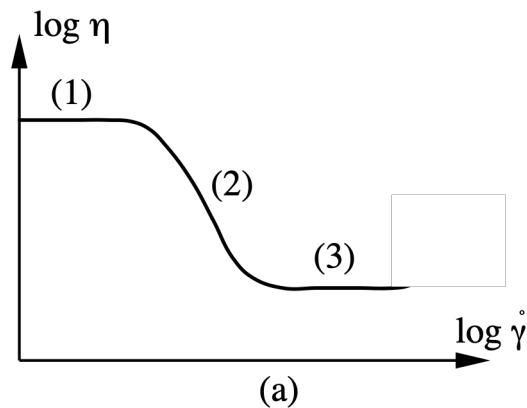
Viscosité de la matrice, η

Comportement Newtonien:

Viscosité est constante avec le taux de cisaillement

Mais il est possible d'avoir des matrices non-newtoniennes

-> il faut prendre en compte $\eta(\dot{\gamma})$ (beaucoup plus compliqué!)



$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \left[1 + (\lambda_c \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{(n-1)}{2}}$$

Carreau equation

Paramètres nécessaires pour résoudre les équations

Milieux poreux= lit de fibres

Perméabilité K

Comportement en compression

Perméabilité

Perméabilité: un tenseur, unités m^2

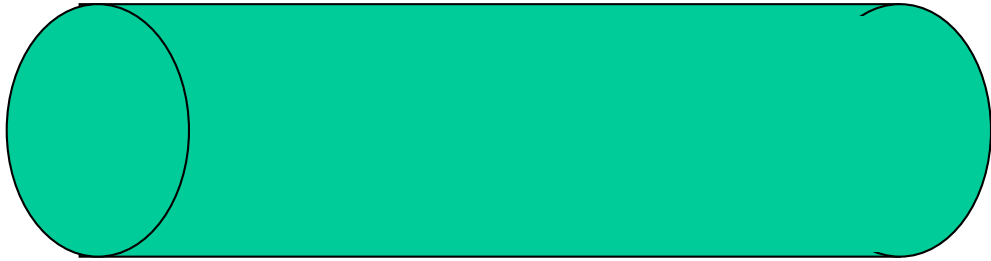
$$K = K_{sat} \cdot K_r$$

K_{sat} est la perméabilité du milieu poreux saturé, fonction du milieu, de la fraction de fibres, et est un tenseur

K_r est la perméabilité relative, fonction de la saturation S , sans unités. Dans le cours, on néglige les effets de non-saturation, donc $S=1$ tout le temps dans la partie infiltrée, et $K_r=1$ aussi.

Calculs de perméabilité

Perméabilité pour un écoulement de Poiseuille dans un tube cylindrique:



$$u_x(r) = -\frac{\partial p}{\partial x} \frac{R^2}{4\eta} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

$$Q = \left(\frac{-dp/dx}{2\eta} \right) \left(\frac{\pi R^4}{4} \right)$$

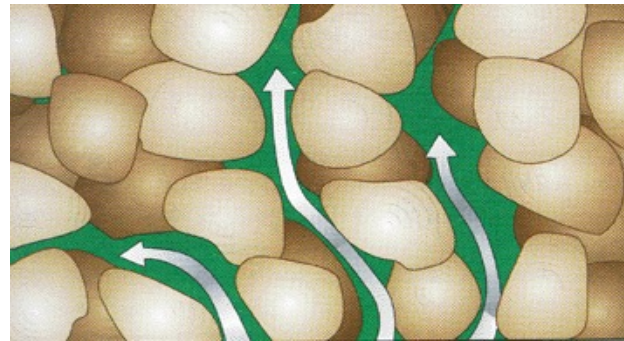
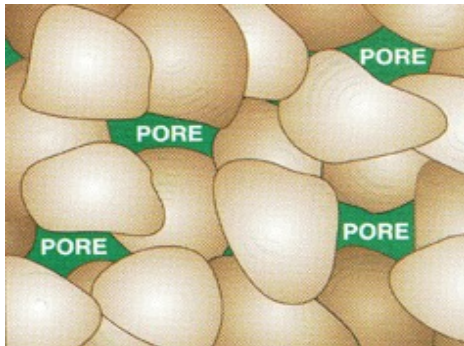
On trouve: $K=R^2/8$

Qu'est ce que la perméabilité d'un matériau poreux?

Soil science

Permeability - represents the ability of a porous material to transmit fluids

Interconnected porosity



Darcy's law

$$(1D): \frac{v}{V} = - \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{L}$$

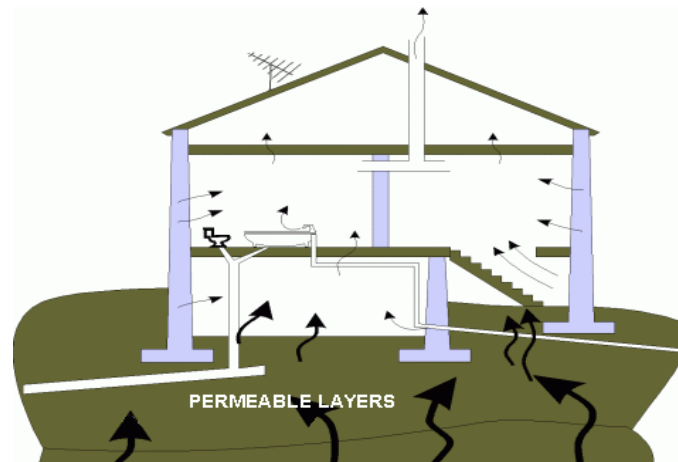
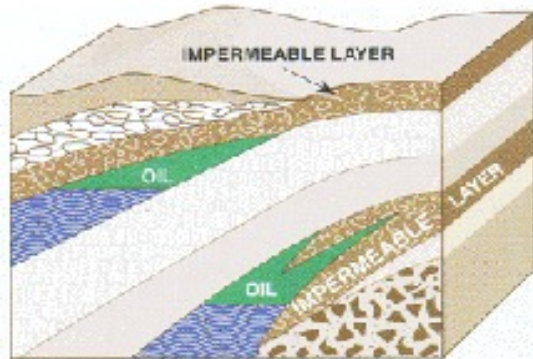
v – superficial velocity

K – permeability

μ – viscosity

ΔP – pressure gradient

L – length



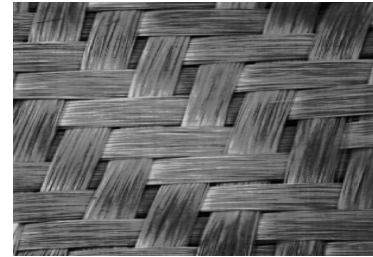
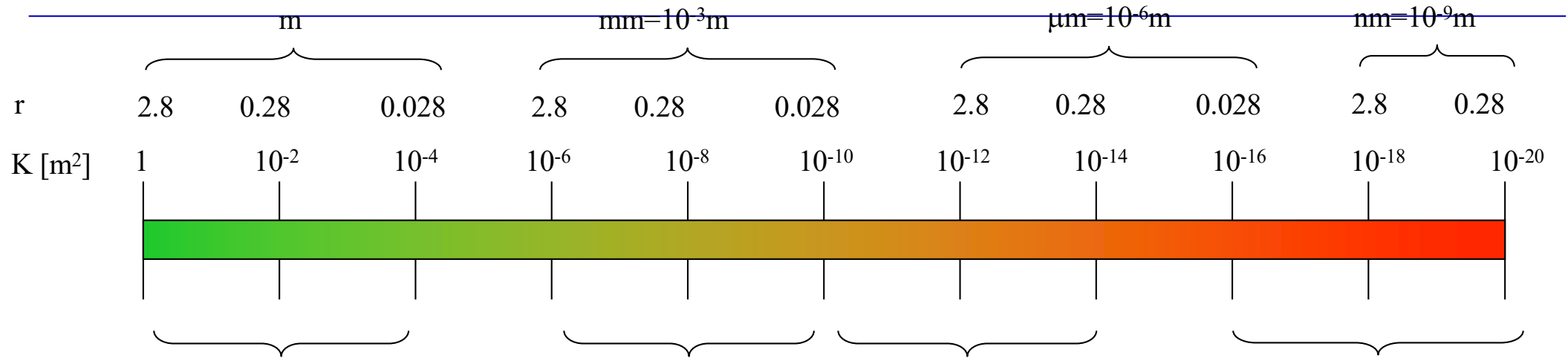
Analogy with Poiseuille's equation

$$\frac{Q}{A} = \frac{1}{\mu} \frac{r^2}{8} \frac{\Delta P}{L}$$

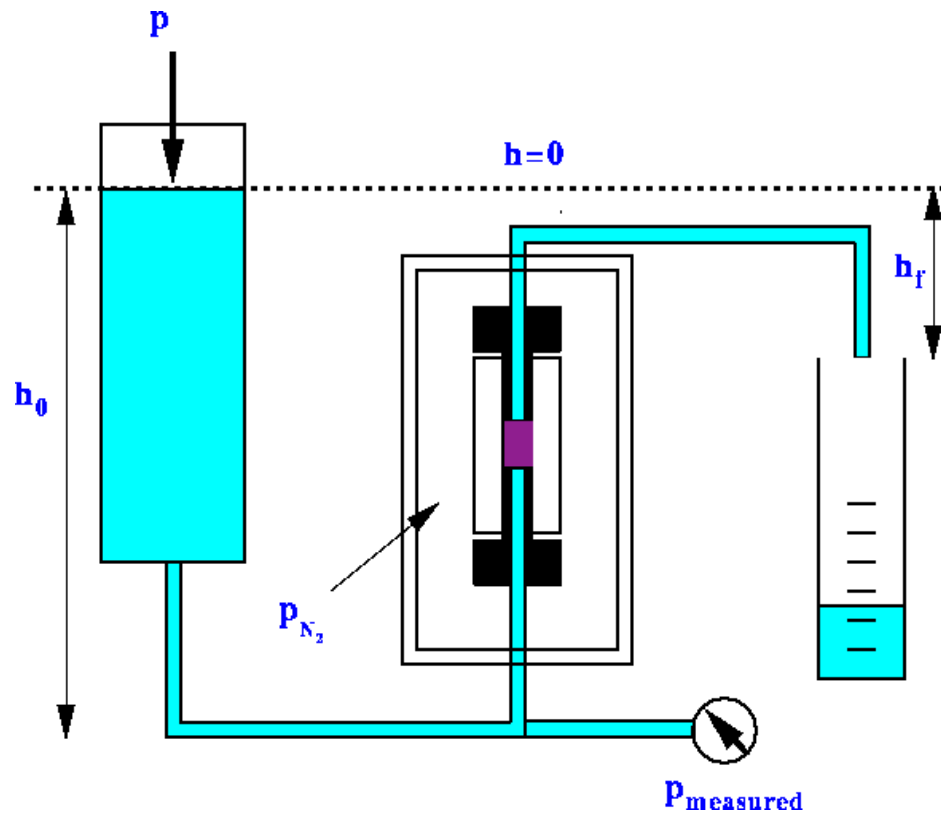
$$u_x(r) = - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{R^2}{4\eta} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

S. Tavares

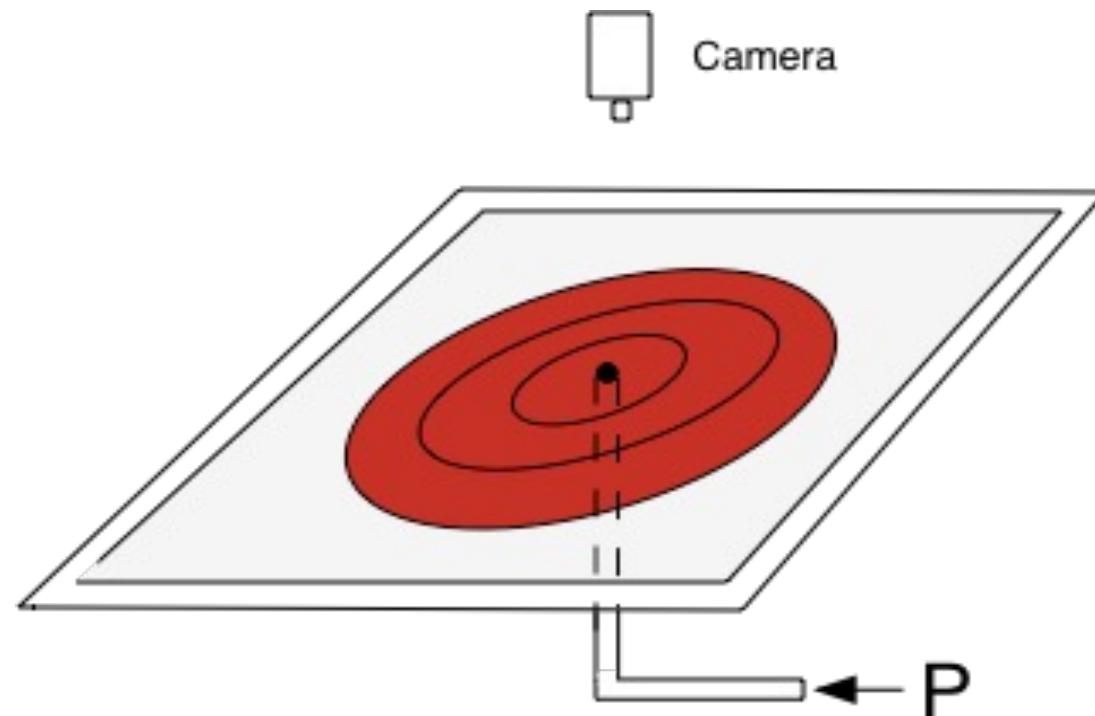
Valeurs de perméabilité



Mesure de perméabilité

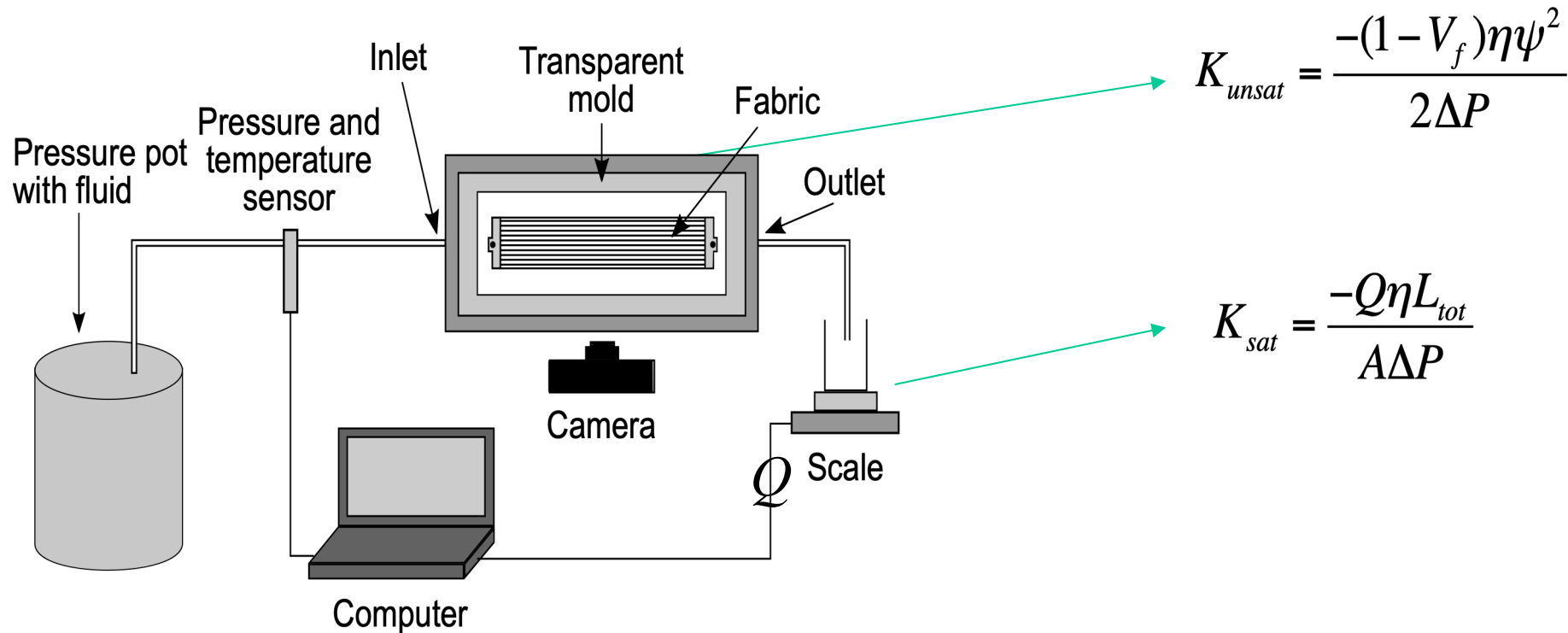


Perméabilité transverse



Perméabilité dans le plan

Perméabilité dans le plan (cf TP)

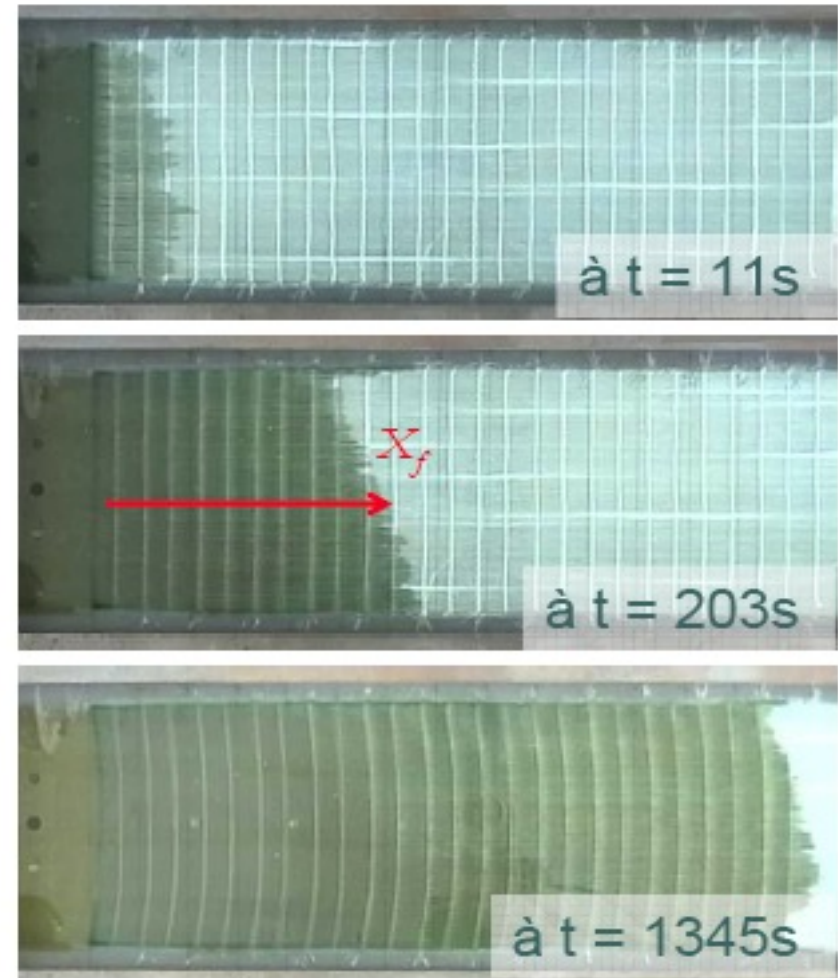
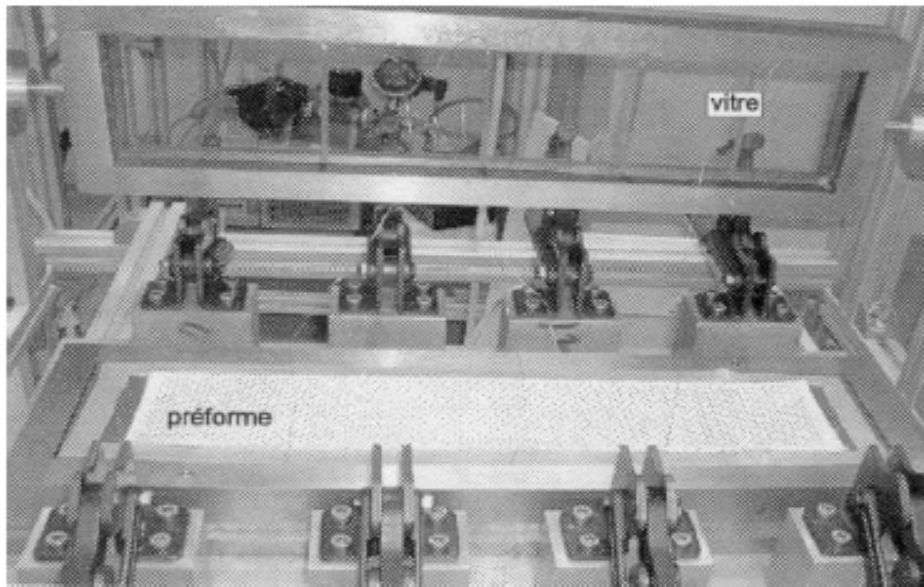


$L(t)$ = flow front position at time t

$-\Delta P$ = fluid pressure at inlet, **Neglecting capillary pressure**

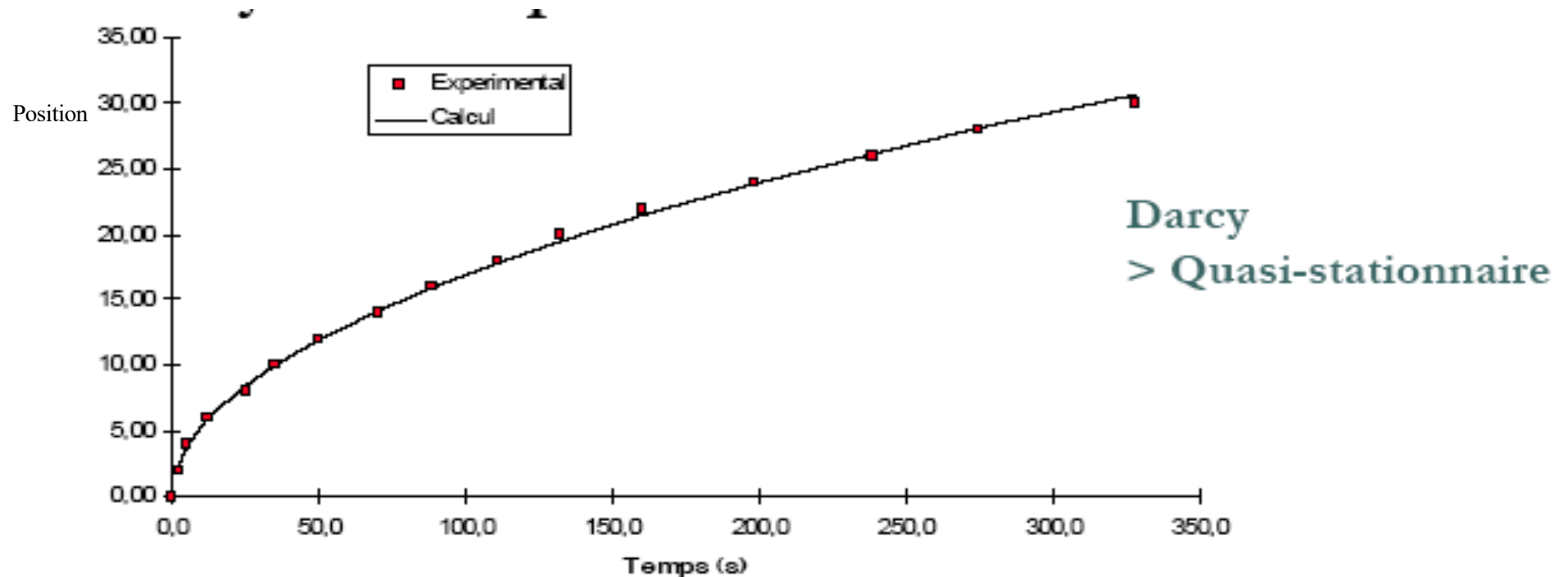
Q = flow rate of outcoming fluid

Exemple de mesure



From Bréard et al,

Exemple de mesure



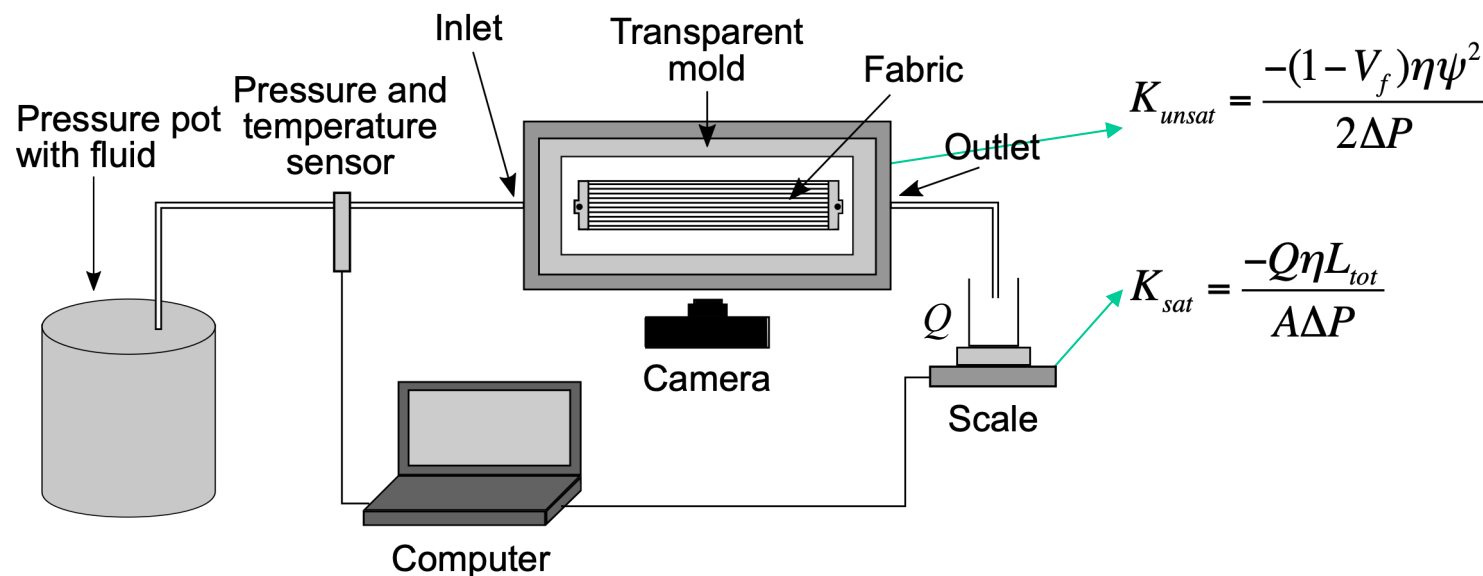
Mesure, tracer la position du front en fct du temps, evaluer $\psi^2 = L^2/t$, avec un fluide de viscosité connue, pression appliquée constante, la perméabilité est:

$$K_{unsat} = \frac{-(1 - V_f)\eta\psi^2}{2\Delta P}$$

Attention, perméabilité non saturée!!!!

Mesure de perméabilité saturée

Pression constante, écoulement unidirectionnel, fluide de viscosité connue



K_{sat} and K_{unsat} ne sont souvent pas égaux

$L(t)$ = flow front position at time t

$-\Delta P$ = fluid pressure at inlet, **Neglecting capillary pressure**

Q = flow rate of outcoming fluid

Variabilité dans les mesures

Même tissu de Carbone Sergé 2/2, envoyé dans de multiples labos

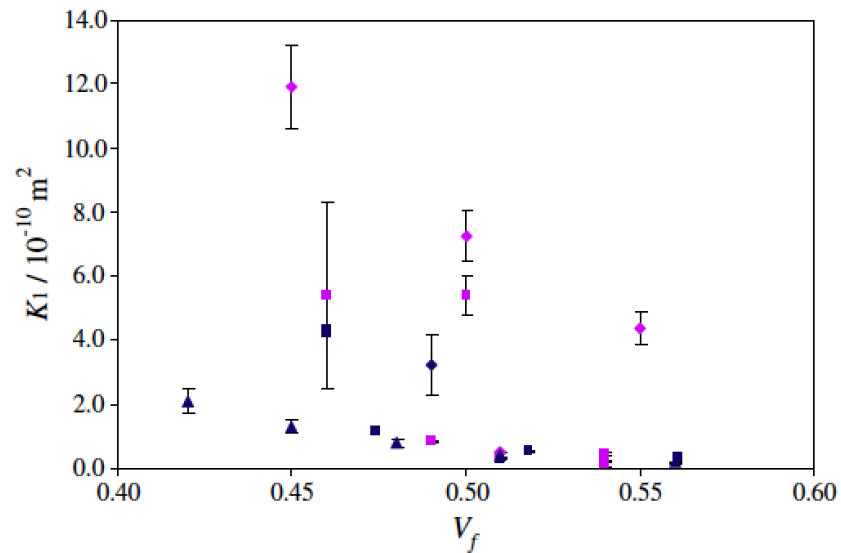
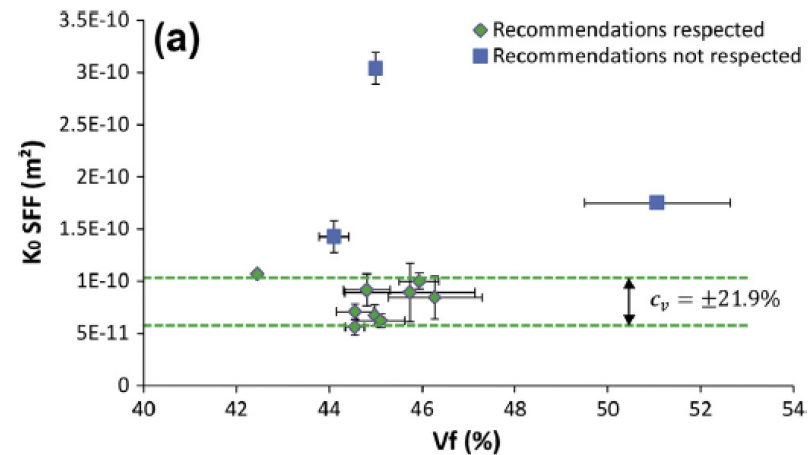


Fig. 1. G0986: Measured principal permeability value K_1 as a function of the fibre volume fraction V_f . Different symbols indicate experimental method (dark diamond: radial unsat.; light diamond: radial sat.; dark square: linear unsat.; light square: linear sat.; dark triangle: 1D compression).

R. Arbter et al. / Composites: Part A 42 (2011) 1157–1168



Permeability of the same fabric, measured following precise guidelines, K_{unsat} , silicone oil.

N. Vernet et al. / Composites: Part A 61 (2014) 172–184

Mesures variables à cause de différents montages, tissus eux mêmes difficiles à couper ou assembler, déformation du set-up, etc...mais il y a du progrès! Une norme de mesure de perméabilité dans le plan est sortie en Juillet 2023: ISO 4410.4

Valeurs de perméabilité

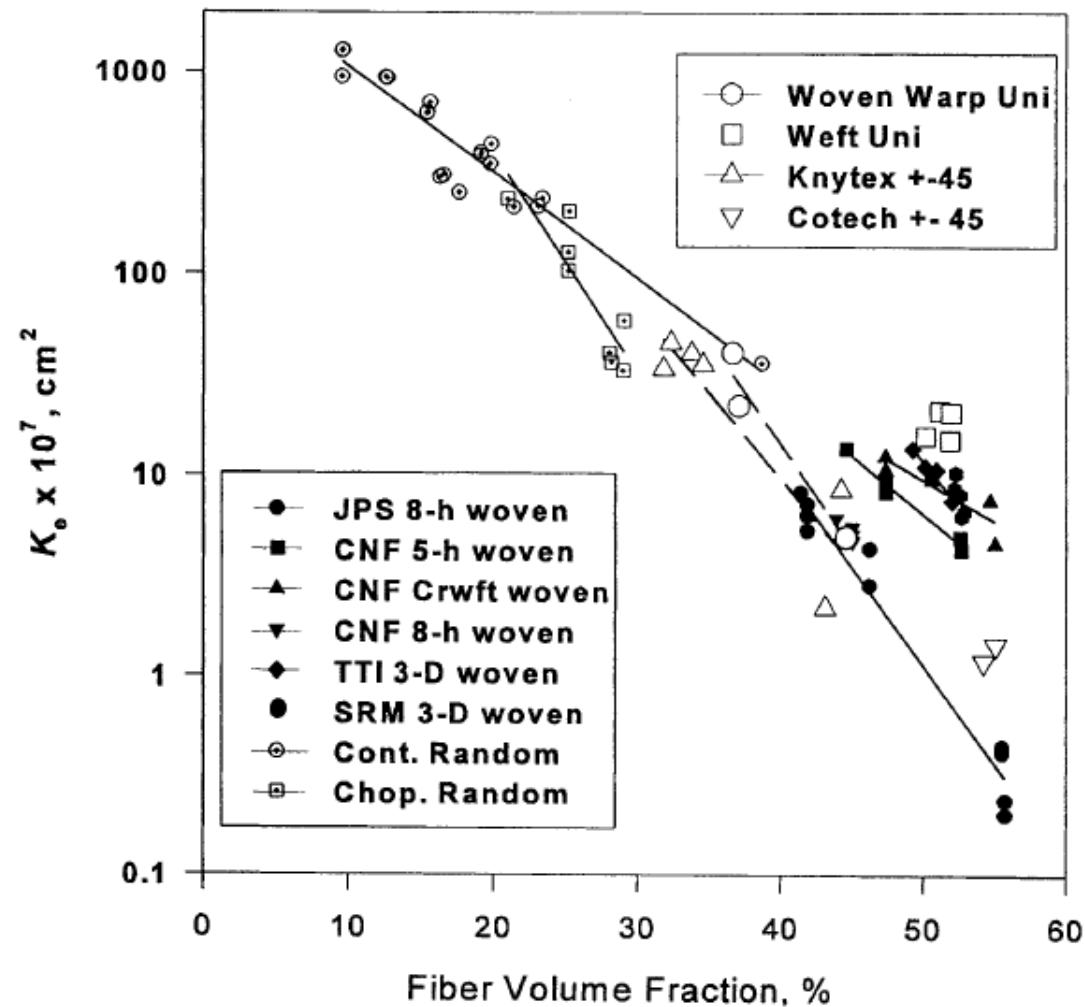
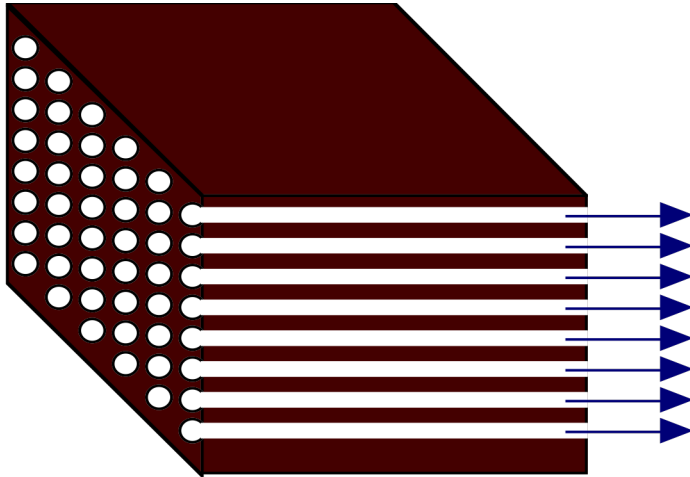


Fig. 4. The in-plane unidirectional saturated flow measurements conducted with random, woven, unidirectional, and stitched fabrics. For the case of anisotropic permeabilities, the higher permeability is displayed.

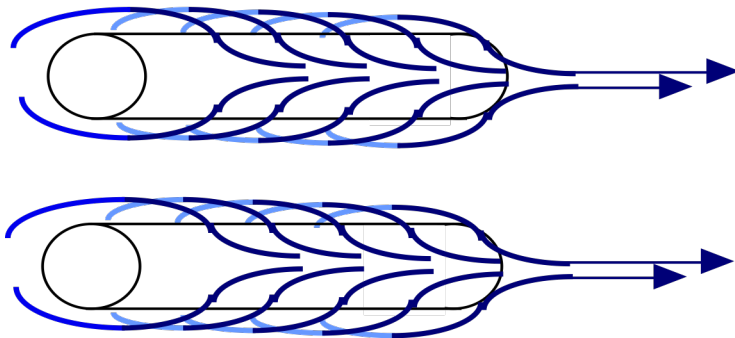
Perméabilité saturée : prédiction



Parallel tube bundle model:
Carmann-Kozeny equation
(Carman 1938, ...)

$$K = \frac{R^2}{4k_{i,i}} \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2}$$

R is the fiber radius, V_f is the fiber volume fraction, $k_{i,i}$ the Kozeny-Carman constant ($i=x, y, z$)

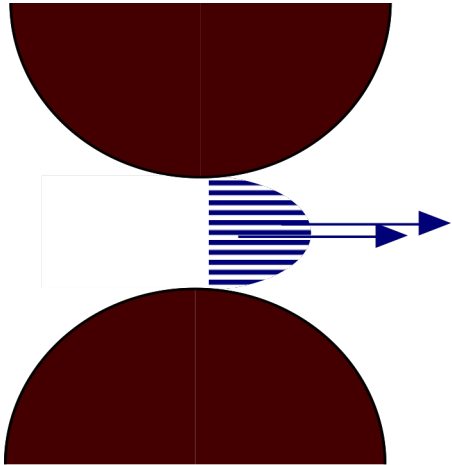


Viscous drag
models
(Langmuir 1942,
Happel 1959, ...)

$$\frac{K}{r^2} = \frac{1}{8\Phi} \left(2\Phi - \ln(\Phi) - 1.476 - 1.774\Phi + 4.076\Phi^3 \right)$$

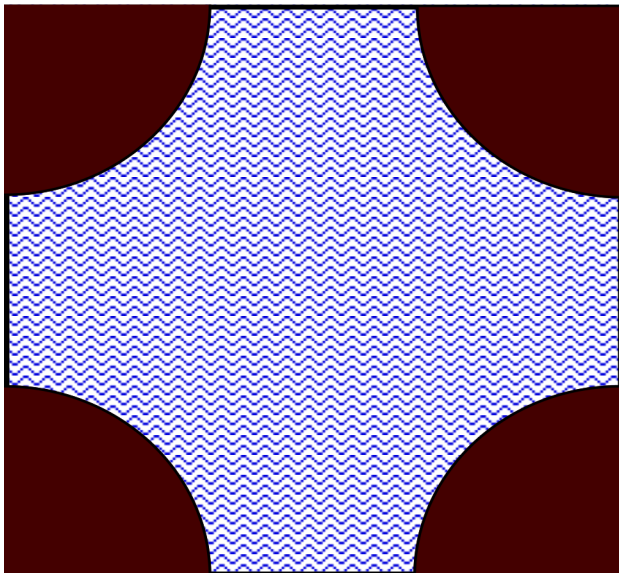
Φ est la fraction volumique de fibres et $\leq 10\%$,
quadratic arrangement, r le rayon de la fibre

Perméabilité saturée : prédiction



Lubrication theory
(Keller 1964 ...)

$$\frac{K}{r^2} = \frac{1}{9\Phi\sqrt{2}} \left(1 - \sqrt{\frac{4\Phi}{\pi}} \right)^{5/2}$$

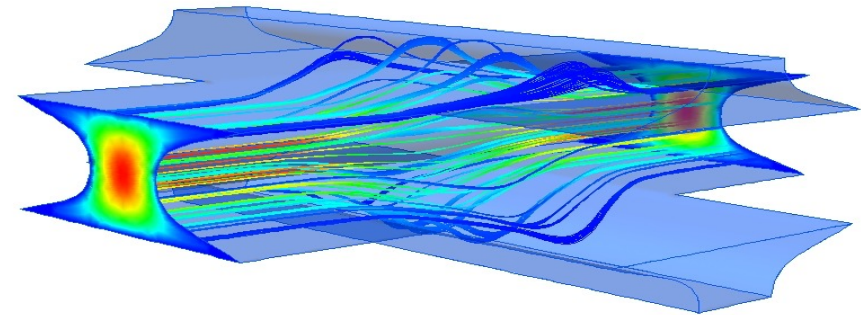
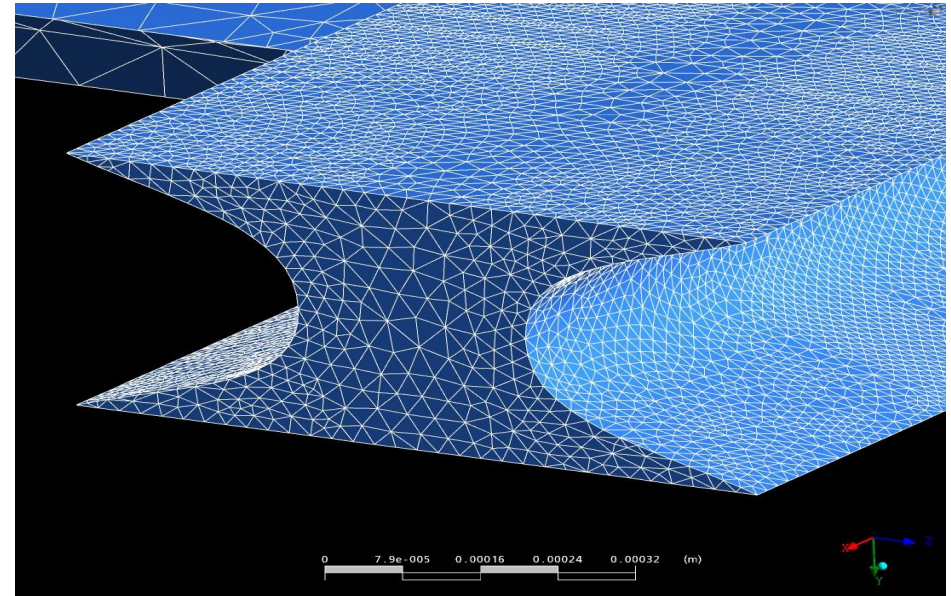


$10\% \leq \Phi \leq \Phi_{\max}$, quadratic arrangement

Unit cell models
(Sangani and Acrivos
1982, Drummond and
Tahir 1984...)

Perméabilité saturée : prédiction

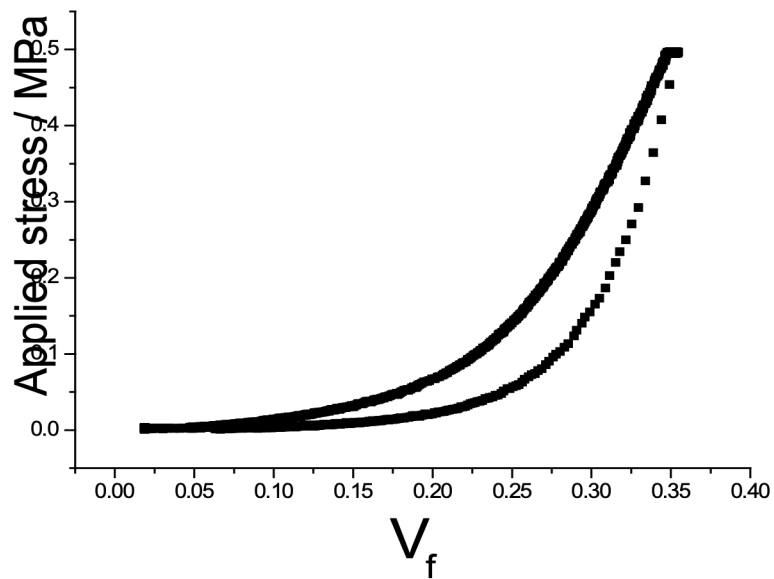
Modèles « unit cell », reproduisant l'architecture des fibres dans un REV, puis, méthodes numériques de type CFD (computational fluid dynamics) pour simuler l'écoulement dans le REV, et la chute de pression: on trouve ensuite la perméabilité.



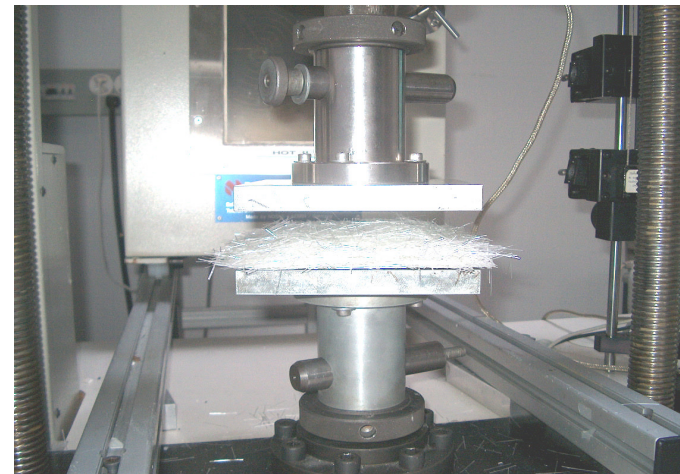
Courbes de compaction

- $\frac{d\sigma}{dV_f}$

- souvent non-linéaire
- hystéretique
- dépend du nombre de couches



Compressive test



Modélisation de la compression

Un grand nombre de modèles existe, surtout pour la phase de compression.

Il faut trouver:

$$\sigma = f(\varepsilon_{zz})$$

$$\sigma = f(V_f)$$

Modélisation de la compression

Modèles basés sur la mécanique des sols:

$$\sigma = C(\varepsilon_{zz}) \varepsilon_{zz}$$

Où C est un module de compression.

Si C est constant, on a un cas de ressort linéaire.

En général, C n'est pas constant.

On peut aussi introduire une notion de plasticité,

Avec:

$$\sigma = C(\varepsilon_{zz}) (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{zz}^p)$$

Modélisation de la compression

Modèles fondés sur les textiles (Van Wyck, Toll...)

$$\sigma = k(V_f^n - V_{f0}^n)$$

Où k est linéairement dépendant du module E des fibres.

Assemblage de fibres en 3D aléatoire: n=3

Assemblage de fibres en 2D aléatoire: n=5

Assemblage de fibres parallèles: n=12-15

Modélisation de la compression

Modèles basés sur la mécanique des poutres (Gutowski)

$$\sigma = \frac{3\pi E}{\beta^4} \frac{\left(1 - \sqrt{\frac{V_f}{V_o}}\right)}{\left(\sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1\right)^4}$$

Où V_o , V_a et β sont déterminés empiriquement.

Base de cette équation:

Le lit de fibres est représenté par un ensemble de points de contact, reliés par des unités de déformation qui sont des segments sinusoidaux.

Le modèle évalue aussi le rôle de la tension, qui augmente la fraction volumique des mèches.

Compression de renforts dans un fluide

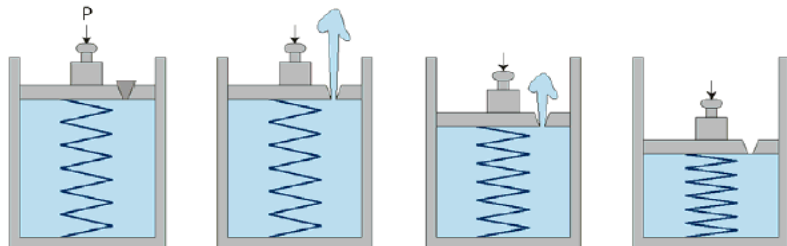
- Lors de la mise en œuvre, les renforts peuvent subir des contraintes de compression, mais aussi de cisaillement et de traction.
- En moulage des composites, il faut distinguer les contraintes appliquées par le moule avant l'injection (cisaillement, compression), et celles qui seront appliquées par la résine en mouvement, qui impliquent un couplage hydro-mécanique dans les équations.

En pratique, que se passe-t-il?

- Equilibre de contrainte entre le lit de fibres et la résine, en saturé et en une dimension:

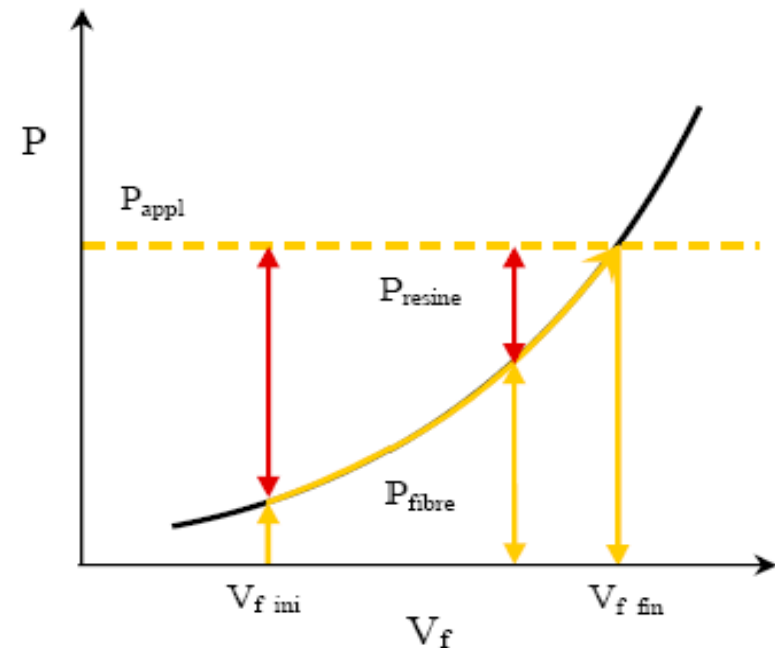
$$\sigma_{appl} = \sigma_{eff} + P_{resine}$$

- Conséquence pendant la fabrication:



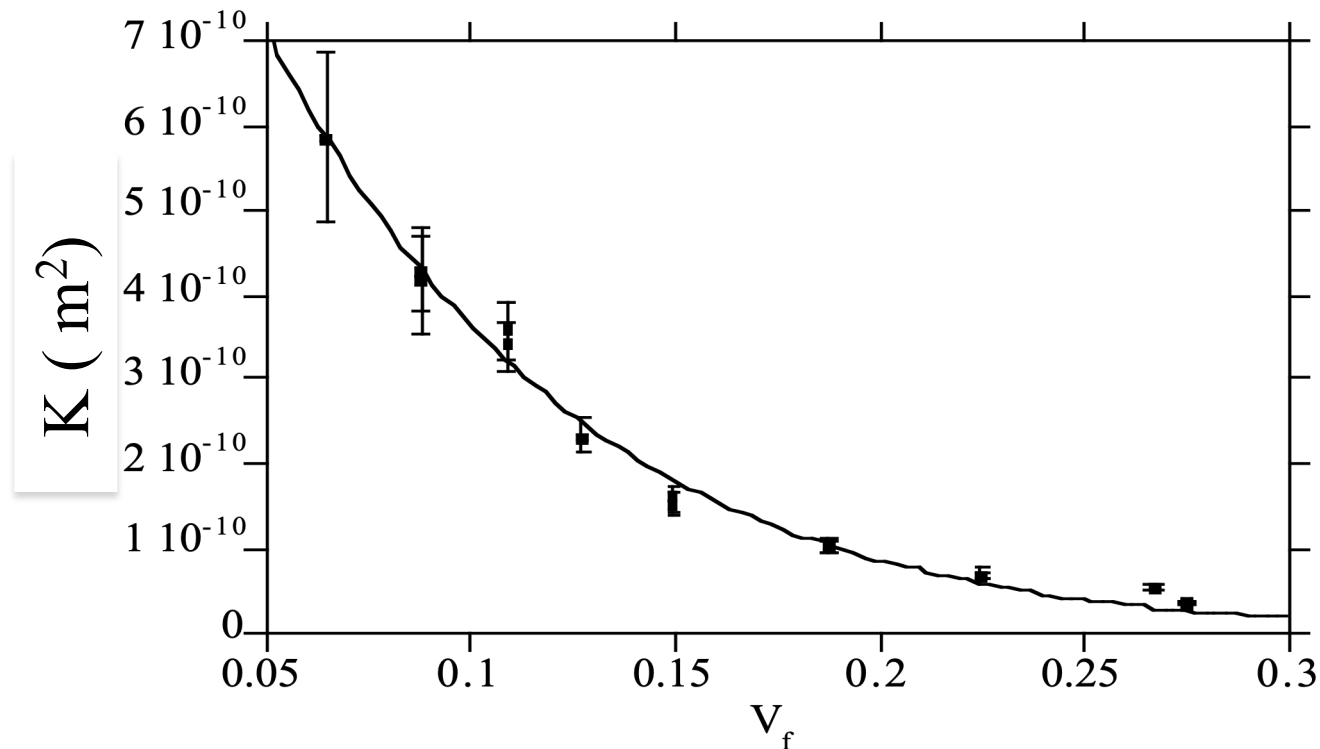
P_{resine}	100	99	50	0
σ_{fibre}	0	1	50	100

(d'après Dave)



Couplage perméabilité/compressibilité

Example of GMT glass fibre mats



Un cas pratique: la coque de bateau

On veut fabriquer une coque de bateau en composite, $L=20$ m, en verre-epoxy.
 $e=3\text{mm}$, $V_f=50\%$



Décision SA, Silver Arrow Marine

Un cas pratique: la coque de bateau

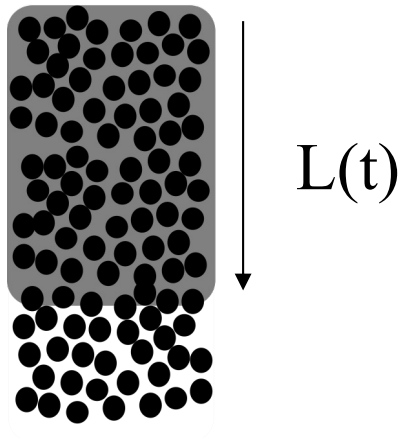
Quel procédé choisir?

- moulage au contact
- prepreg
- infusion de résine, ou RTM?

-On veut voir si le RTM est prometteur
De quels paramètres a-t-on besoin?

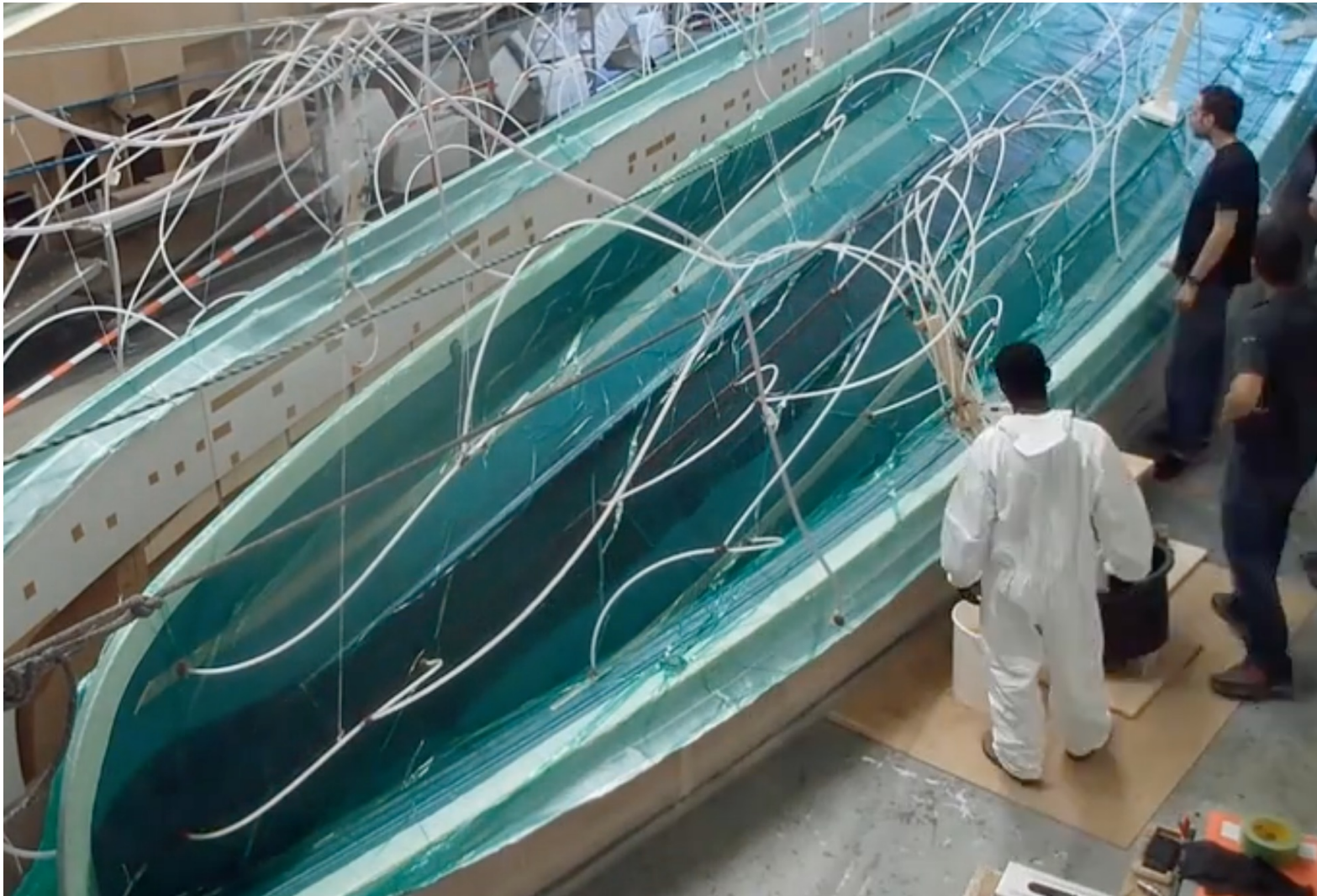
Première approche: analytique

Montrez que le temps d'imprégnation, pour l'écoulement isotherme saturé sous pression constante d'une résine dans un milieu poreux incompressible est:



$$t_{\text{imprégnation}} = \eta \frac{(1 - V_f)L^2}{2K(P_a - \Delta P_c - P_{atm})}$$

La technique adoptée



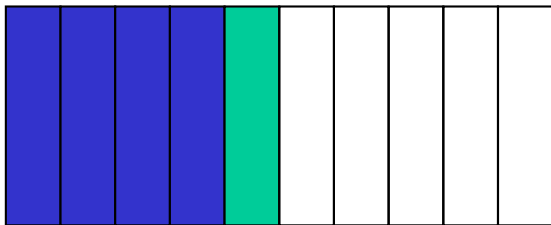
Infusion de résine sous vide

Décision SA

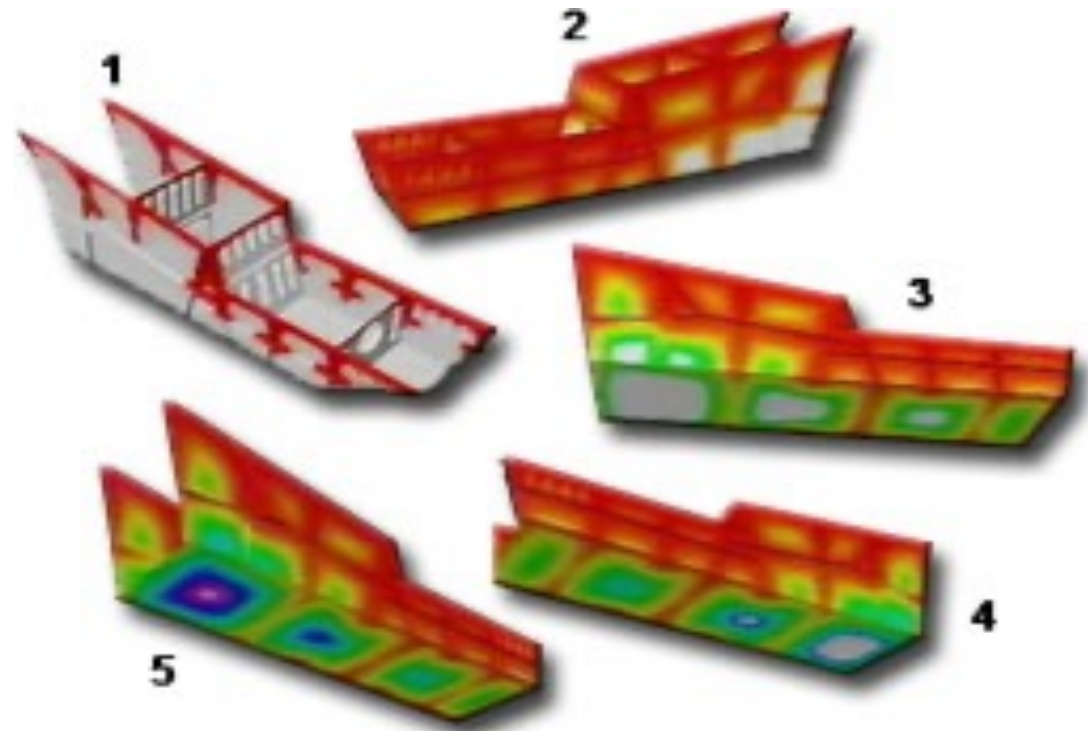
Approche plus complète

Modélisation par éléments finis, problème de la position du front

- En 2, 3 D, éléments finis/contrôle de volume
- Exemple du LIMS (Delaware):

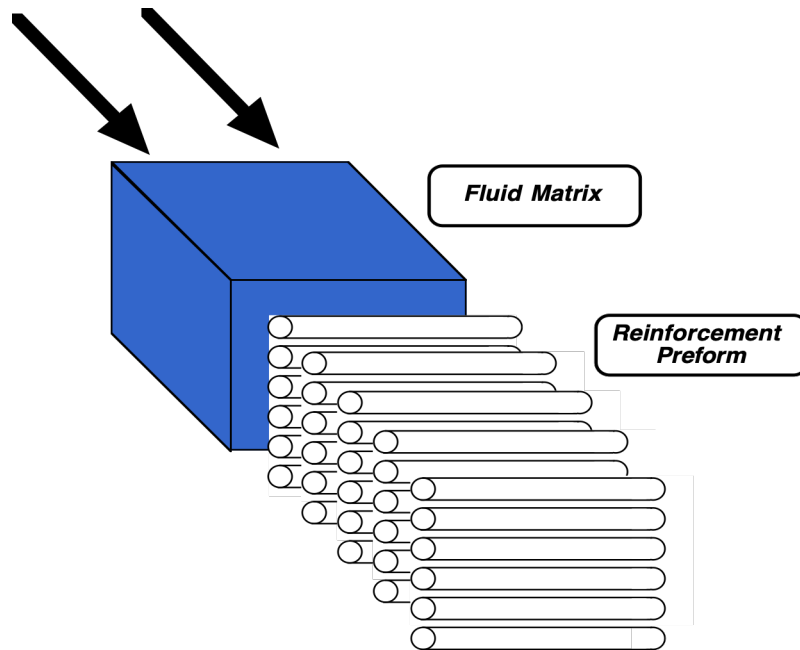


Elements filled

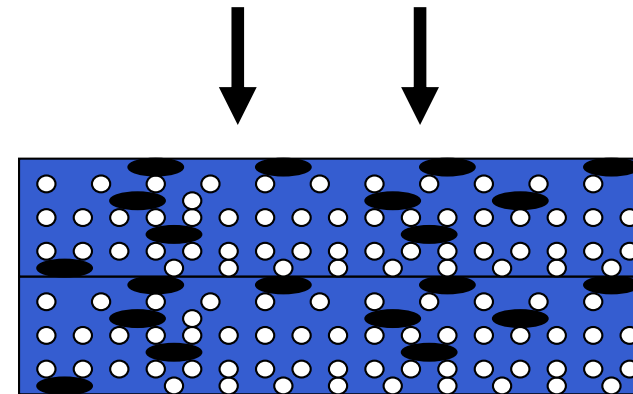


Modélisation

- Dans tous les procédés de fabrication des composites, les phénomènes sont ceux de l'écoulement d'un ou plusieurs fluides dans un milieu poreux, potentiellement compressible, avec potentiellement des transferts de chaleur.
- 2 cas principaux, en plus de l'écoulement d'une suspension chargée:



Infiltration

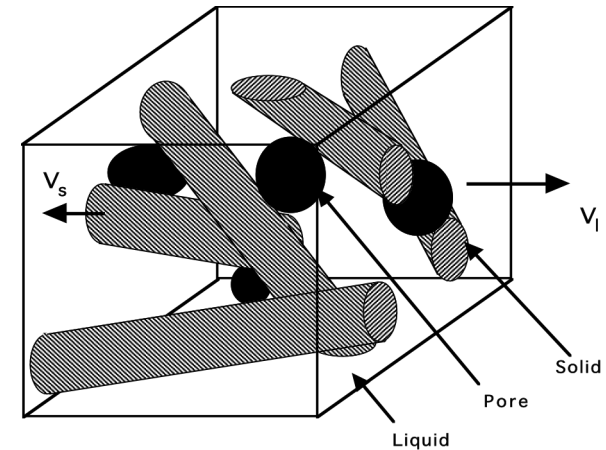


Consolidation, avec ou sans écoulement

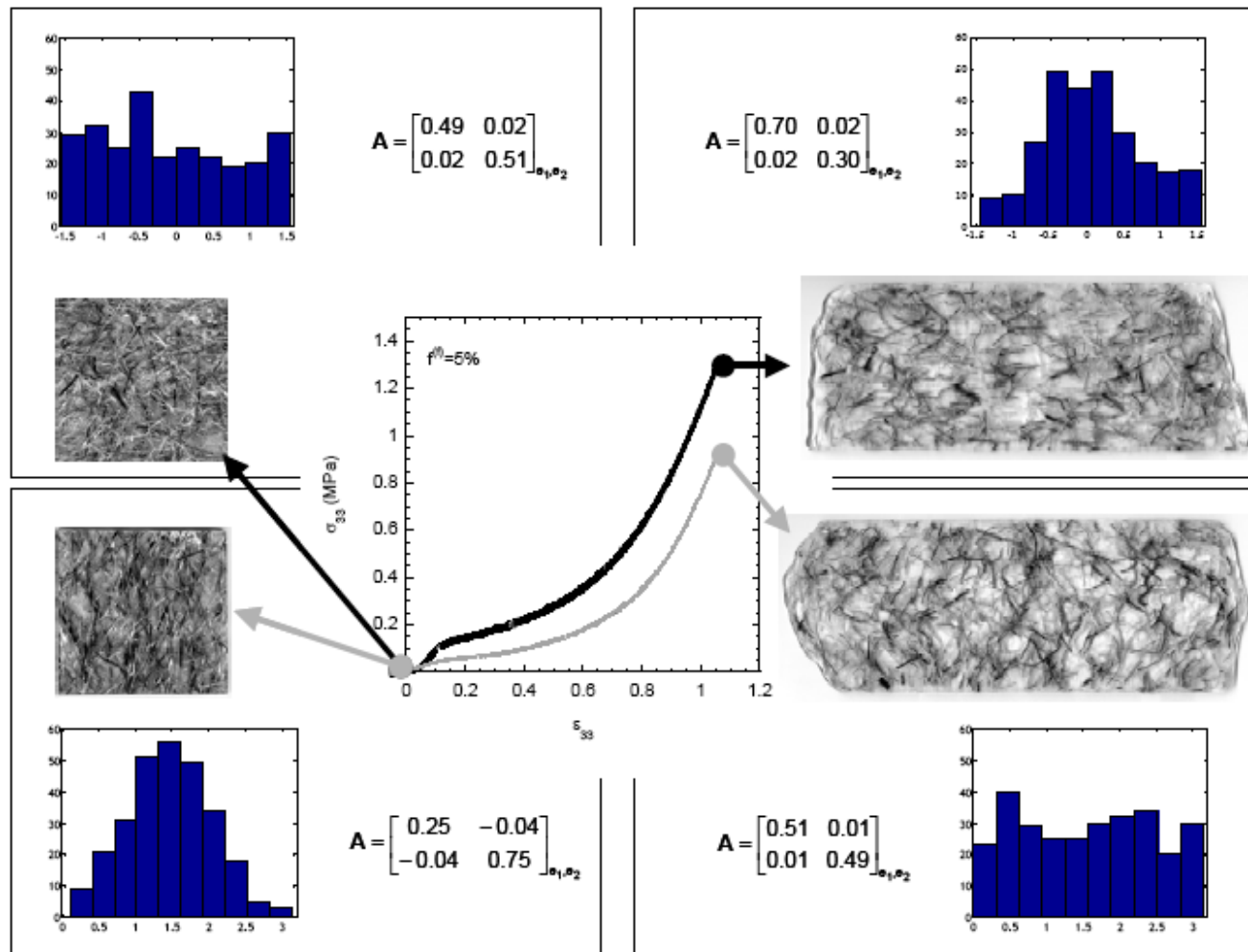
Consolidation

Même approche et équations

- les conditions aux limites changent, l'imprégnation est déjà partiellement faite dans une étape préliminaire.
- introduction de lois d'interaction entre la fibre et la matrice dans le cas où la matrice et les fibres s'écoulent en même temps. Orientation des fibres lors de l'écoulement.



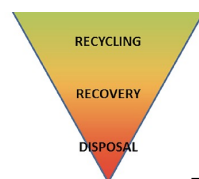
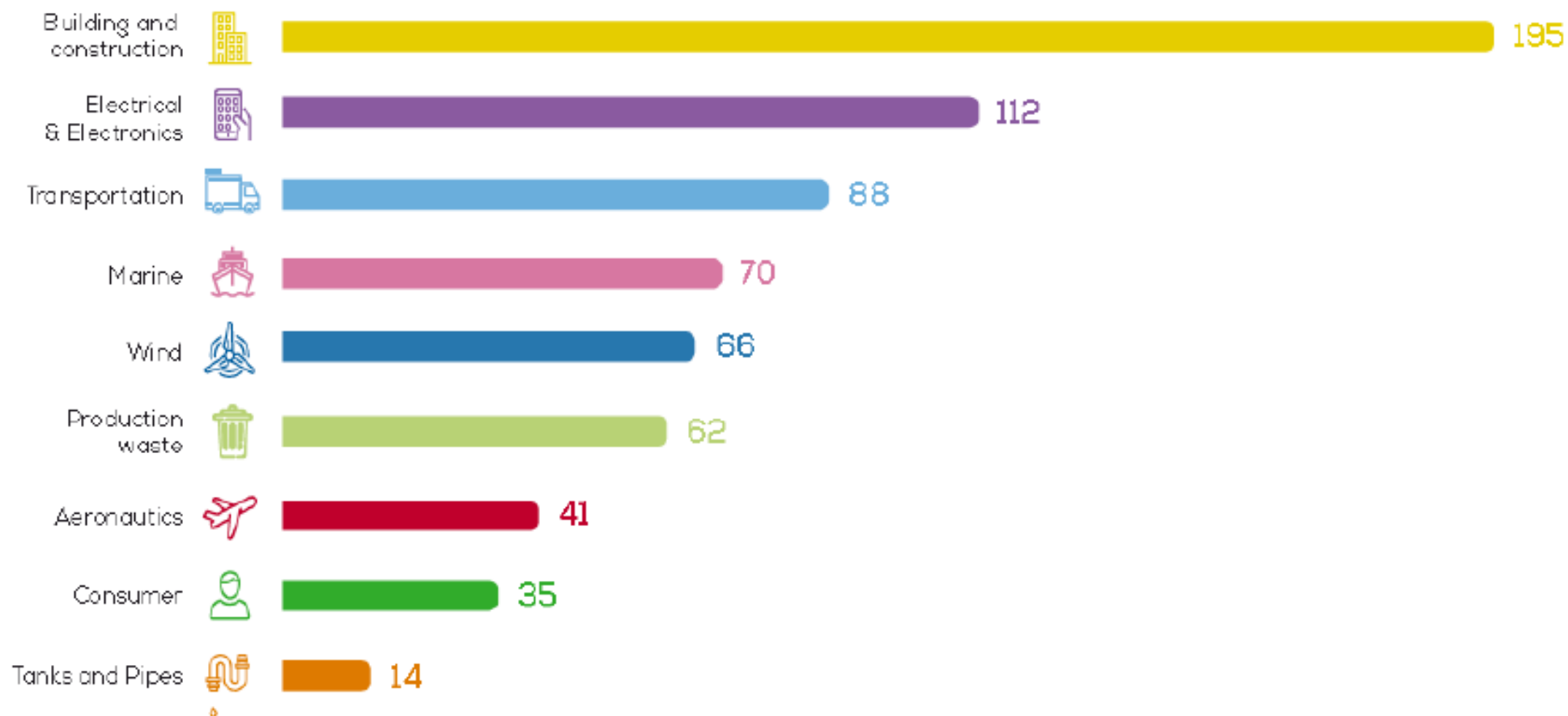
Ecoulement préférentiel des fibres



Moulage par compression de suspension de fibres dans un moule en canal. A, matrice d'orientation, donne la proportion de fibres dans les directions x, y, et xy.

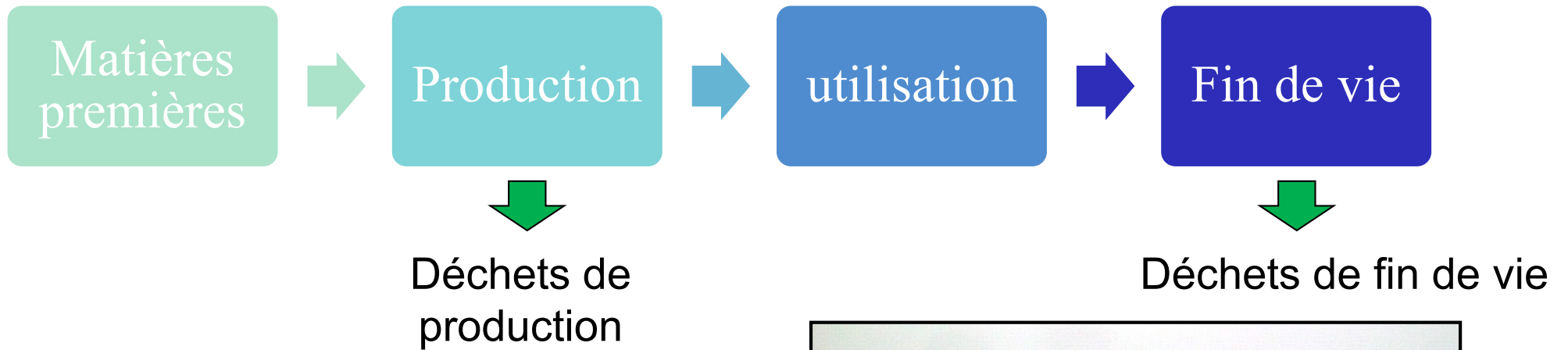
Quelques mots sur la fin de vie

Estimated composite waste per sector in thousands of tonnes in 2025



European Waste Framework Directive 2008/98/EC.

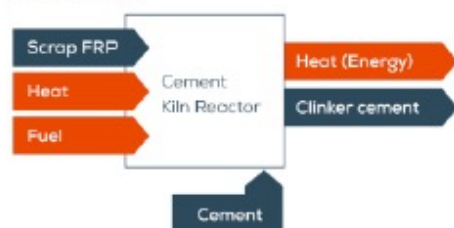
Quelques mots sur le recyclage



Méthodes de recyclage possibles

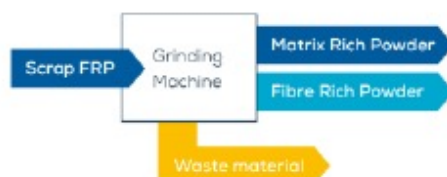
Co-Processing

Current TRL 9



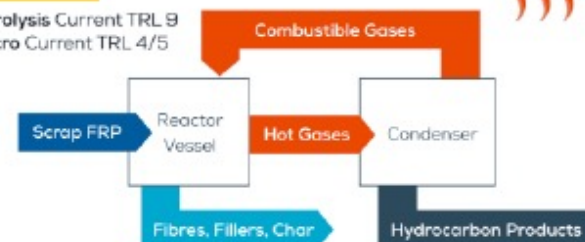
Mechanical Grinding

GFRP Current TRL 9
CFRP Current TRL 6/7



Pyrolysis

Pyrolysis Current TRL 9
Micro Current TRL 4/5



High Voltage Pulse Fragmentation

Current TRL 6



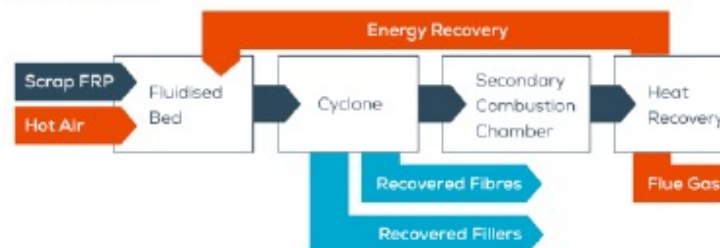
Solvolyis

Current TRL 5/6

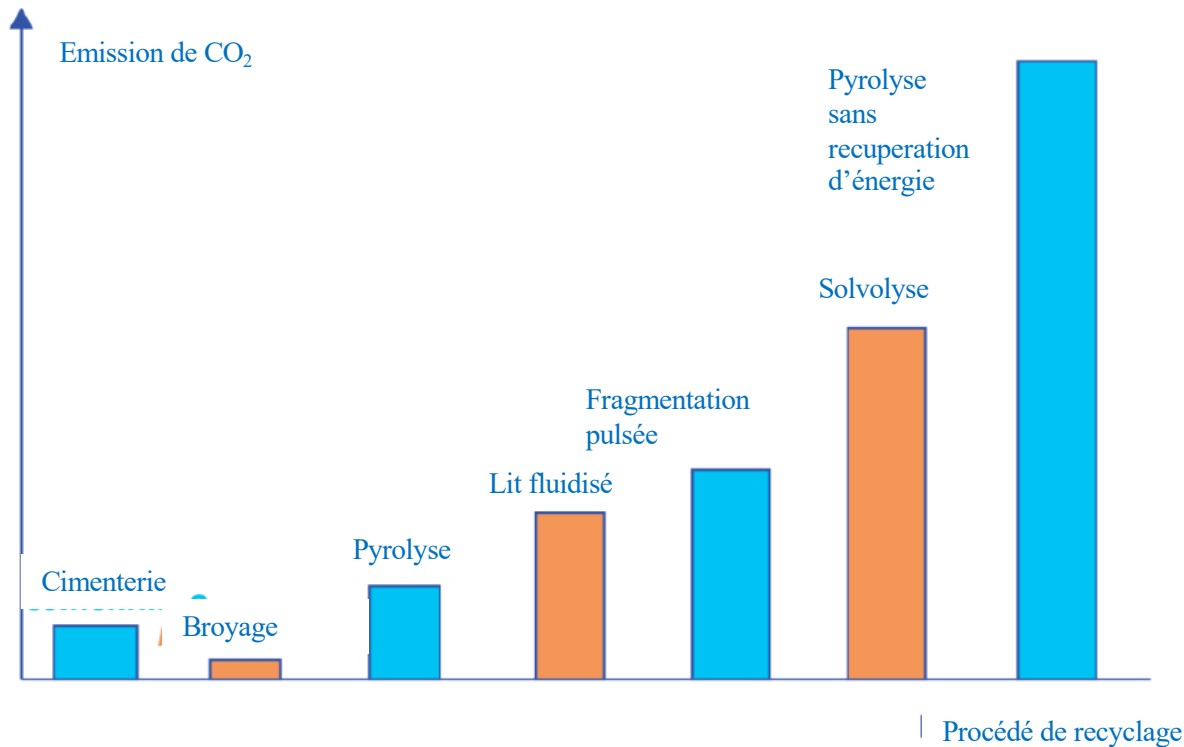


Gasification (Fluidised Bed)

Current TRL 5/6



Méthodes de recyclage possibles



Empreinte carbone des méthodes de recyclage des composites

Il reste encore beaucoup à développer pour rendre plus recyclable les composites...

Bax and company, 2019, à travers un position paper de 2021 de l'association italienne des composites



Abri vélo en aube de turbine



Wind2Water catamaran

Exercice, compaction d'un prepreg, avec écoulement de résine sur les bords

- Compaction à vitesse constante d'un préimprégné, épaisseur h_0 , longueur $2a$, largeur $2b$, fibres UD selon la longueur. Quel est le profil de pression dans la résine selon la longueur x ?
- On prendra l'hypothèse que l'écoulement de résine se fait seulement selon la direction x ; et que la compression est à vitesse constante selon z .



Conclusion

- Les procédés de fabrication des composites sont très variés, et leur choix va dépendre de l'application, des coûts, des cadences de production, etc.
- La connaissance des phénomènes physiques lors de la mise en oeuvre des composites permet de modéliser les procédés et d'établir des fenêtres de mise en œuvre, et donc finalement d'optimiser la forme des moules, le temps de cycle de production, la qualité finale des pièces.