



Préparation de
composites Carbone/Carbone
 par **infiltration chimique**
 sous **gradient thermique**:
 approches de
modélisation thermique
 à **plusieurs échelles**



Gérard L. VIGNOLES *

Université Bordeaux 1

Laboratoire des Composites ThermoStructuraux

David Leutard *, Frédéric Pailler*

Jean-Rodolphe Puiggali°, Jean-François Lines*,°

P. Delhaès#, M. Trinquécoste#, J. Lachaud

Claude-Michel Brauner \$, Nathalie Nadeau\$, *

Roland Duclous*

Patrick David £

G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



PLAN DE LA PRESENTATION

- ★ **Contexte**
- ★ **Modélisation de la TG-CVI à couplage direct**
- ★ **Modélisation du procédé par caléfaction**
- ★ **Etude des fronts de densification**
- ★ **Transferts en milieu poreux fibreux**
- ★ **Conclusion et perspectives**



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011

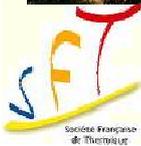


COMPOSITES C/C : APPLICATIONS



Col et divergent Booster ARIANE V

G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



COMPOSITES C/C : APPLICATIONS



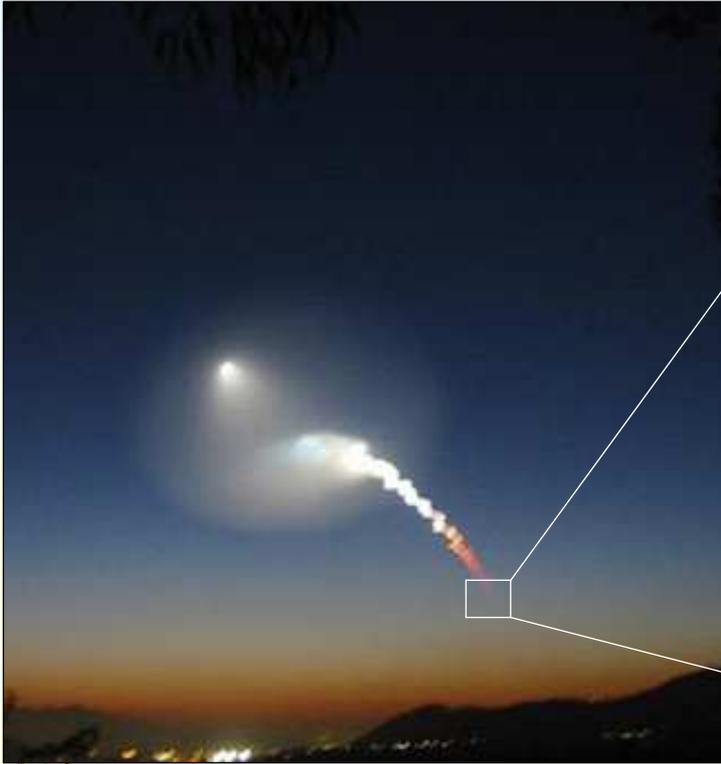
Freins F1 et aéronautique

G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011





COMPOSITES C/C : APPLICATIONS



Systemes de Protection
Thermique pour la
Rentrée Atmosphérique

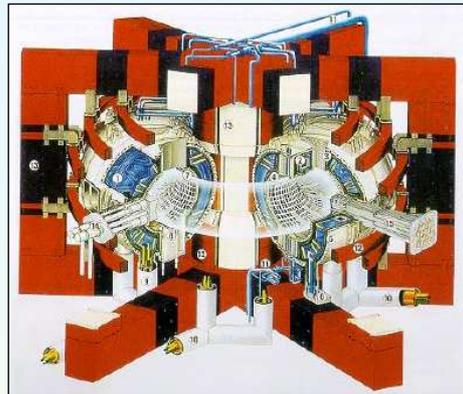


G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



COMPOSITES C/C : APPLICATIONS

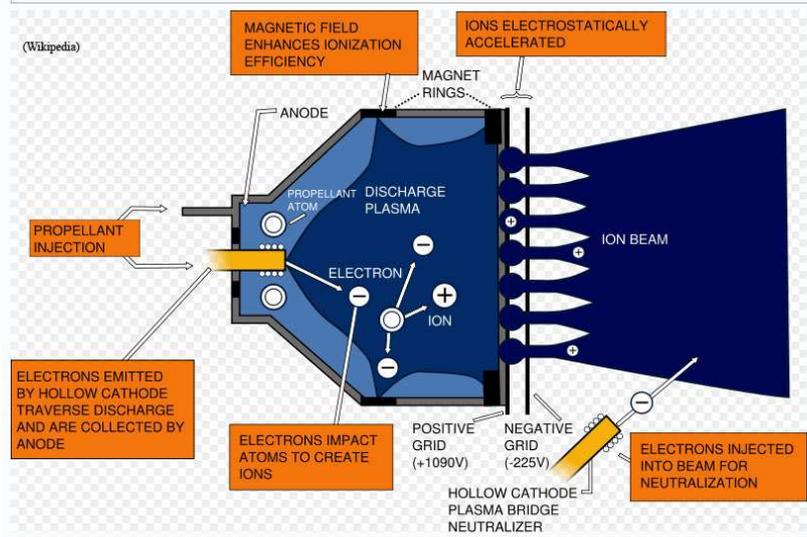
Première paroi
Tokamak



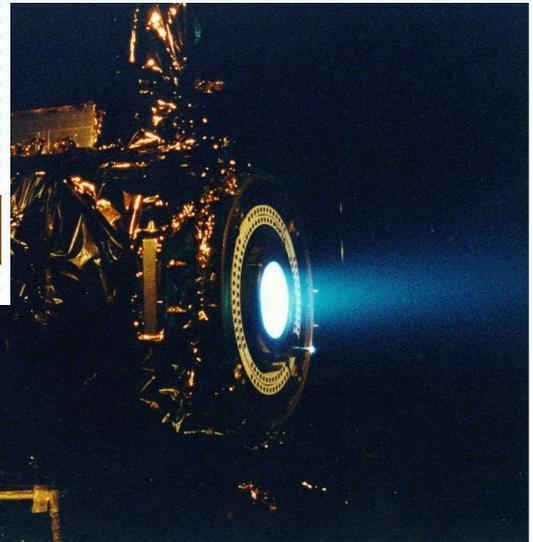
G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



COMPOSITES C/C : APPLICATIONS



Propulsion ionique



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



COMPOSITES C/C : APPLICATIONS

Applications biomédicales



On-X® HEART VALVE

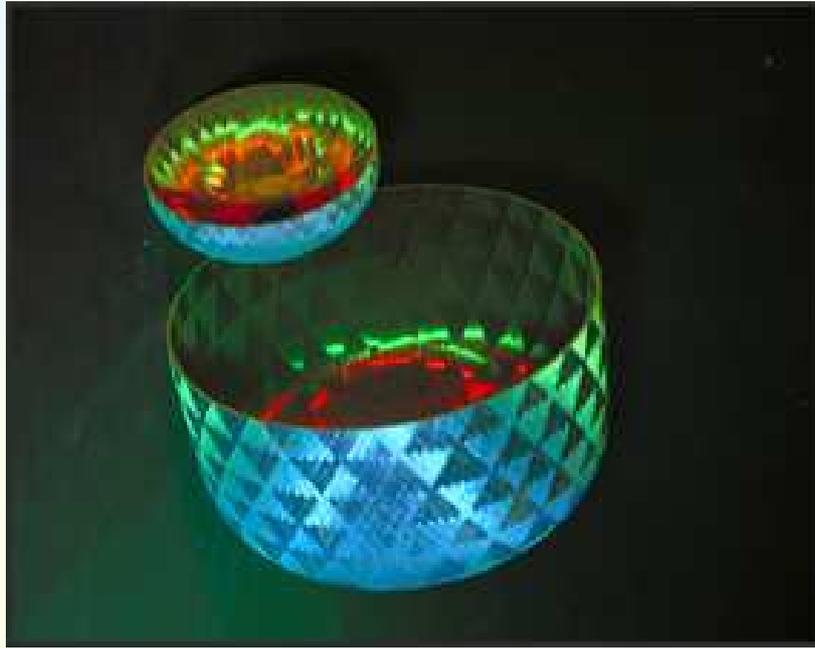


G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



COMPOSITES C/C : APPLICATIONS

Creusets pour fours Czochralski

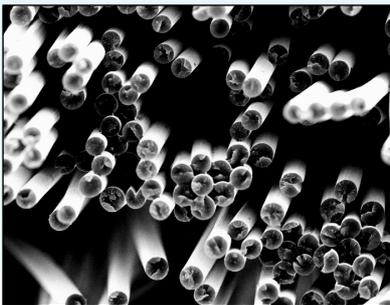


G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011

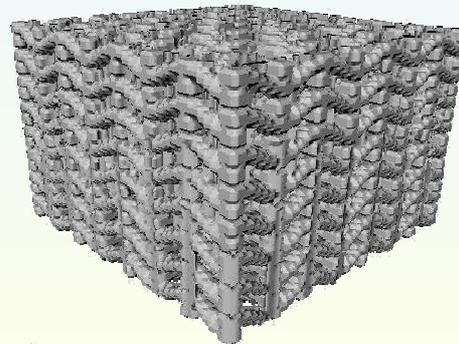


Fabrication des C/C: diverses voies

Fibres



Tissage, aiguilletage, ...



Voie liquide

Matrice

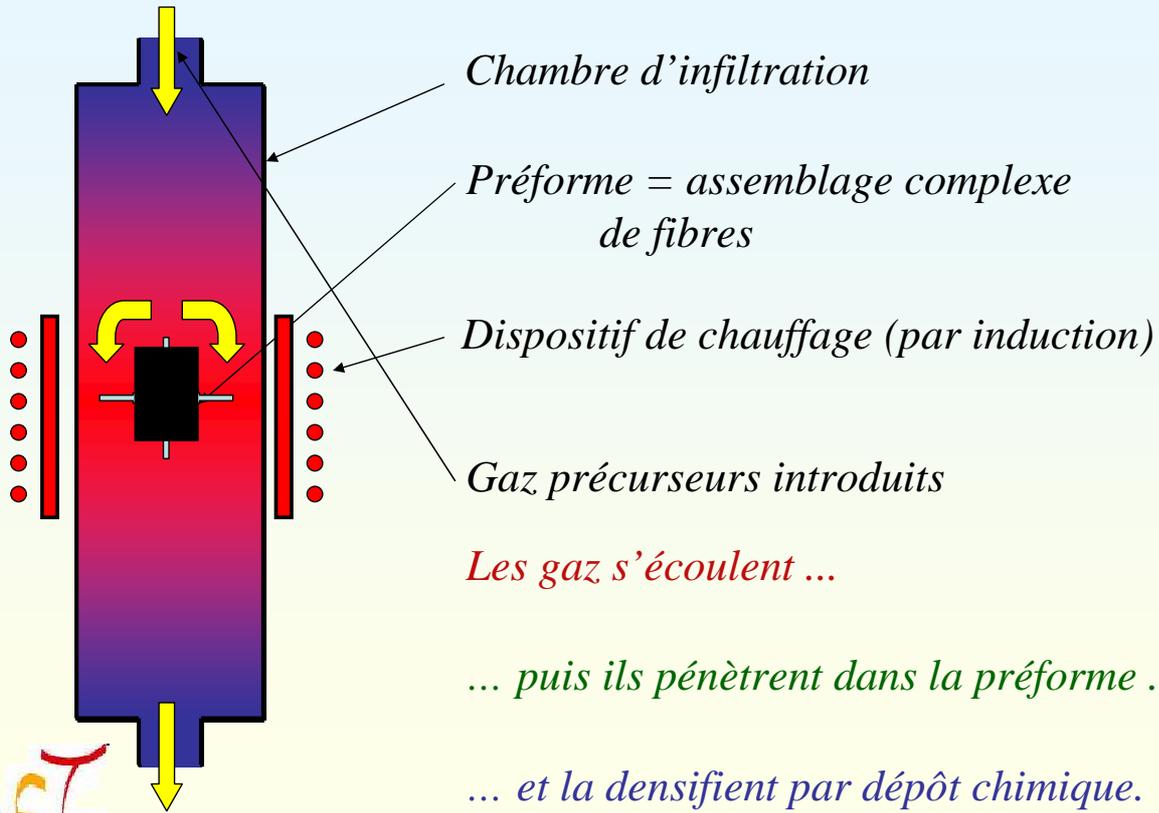
Voie gaz



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Le procédé CVI : principe

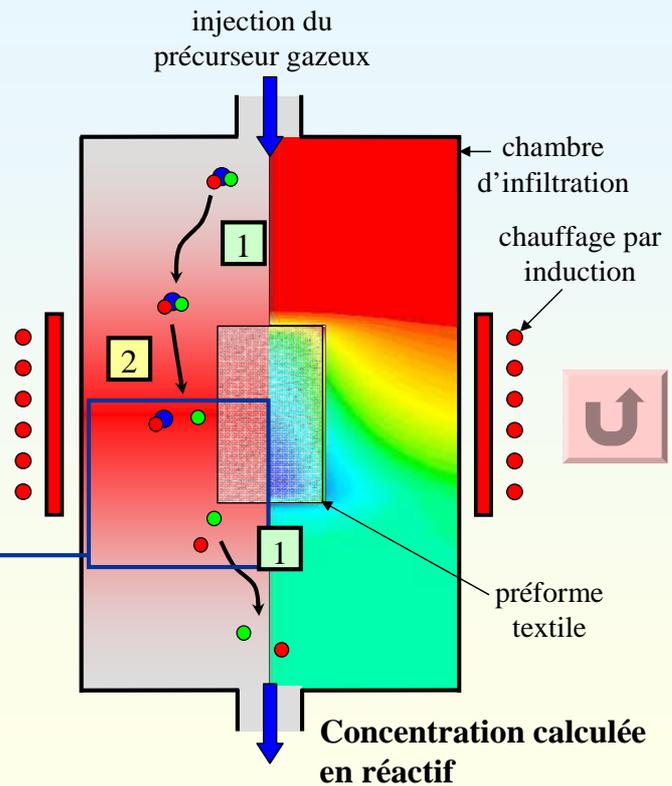
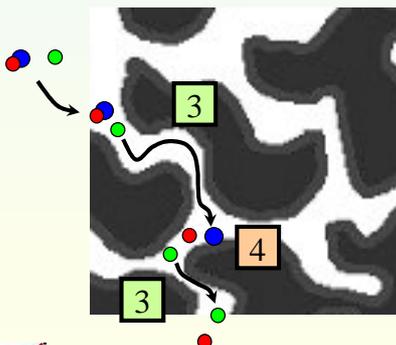


G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Le procédé CVI : principe

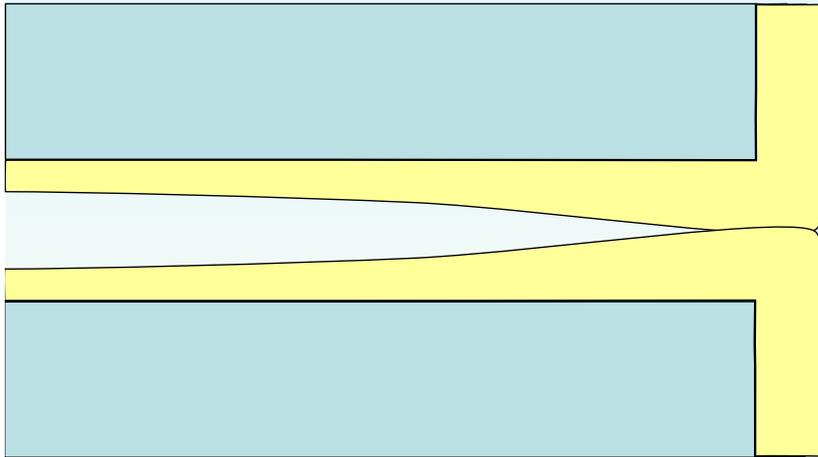
- 1 Transport par convection (et diffusion)
- 2 Réactions chimiques homogènes
- 3 Transport par diffusion (et convection)
- 4 Réactions chimiques hétérogènes (et homogènes)



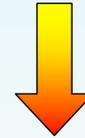
G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



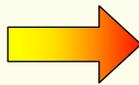
Le procédé CVI : variante à Gradient Thermique



Dépôt isotherme



Bouchage prématuré des pores



Idée : il faut faire partir la réaction chimique depuis le **fond** des pores !



GRADIENT THERMIQUE
(chaud dedans, froid dehors)



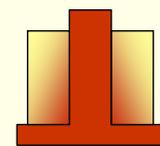
G. L. VIGNOLES *et al.* – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



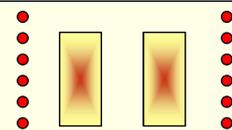
Le procédé CVI à Gradient Thermique

TG-CVI : quelques dispositifs

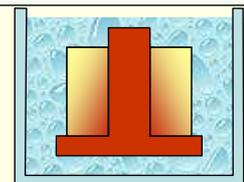
Isobare, chauffage de la préforme par contact avec un élément chauffant :
« **Rapid densification process** » (I. Golecki *et al.*) (Allied Signal)



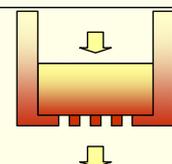
Isobare, chauffage inductif de la préforme par couplage direct ou chauffage micro-ondes :
RF-CVI (Snecma Propulsion Solide) / **MW-CVI** (Economou *et al.*)



Précurseur en ébullition autour de la préforme :
C4 (procédé par caléfaction) ou « **Kalamazoo** » (CEA/SPS, Textron)



Avec flux forcé des gaz :
F-CVI (Besmann, Starr *et al.*) (ORNL)



G. L. VIGNOLES *et al.* – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



La TG-CVI : enjeux

Qualité du matériau C/C :

- Homogénéité du dépôt
- Eviter la *porosité résiduelle*
- Nanotexture* du pyrocarbone

Coût du procédé :

- Gradient => flux => dépense d'*énergie*
- Sécurité* sur procédé potentiellement dangereux



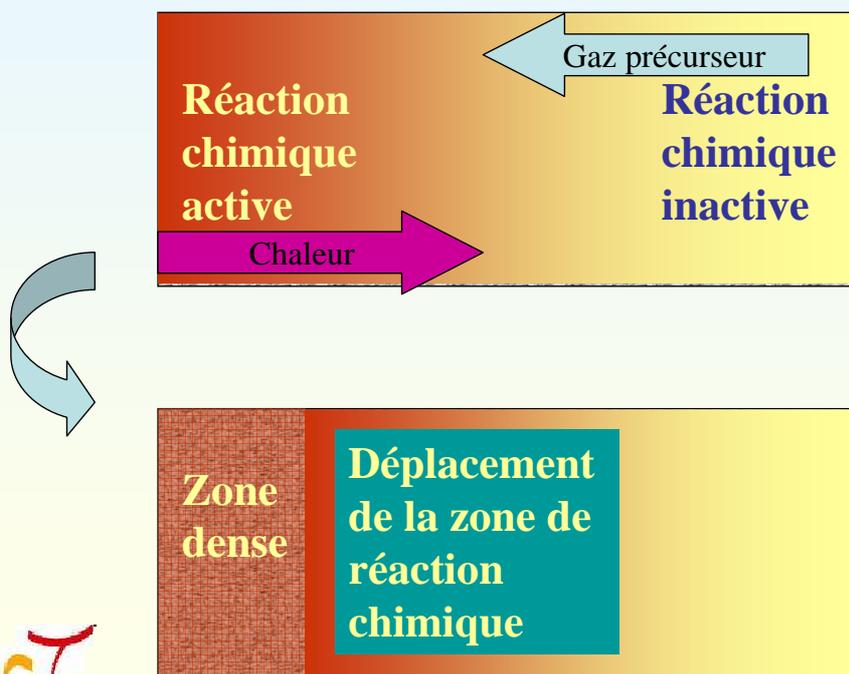
**COMPREHENSION et MODELISATION
de la PHYSICO-CHIMIE**



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



La TG-CVI : phénomènes

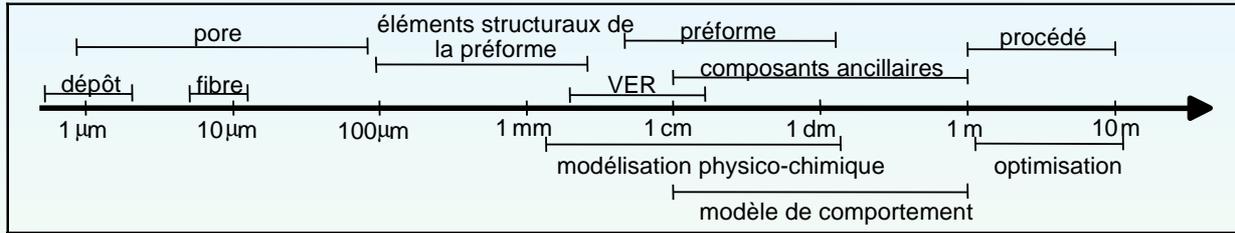


G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011

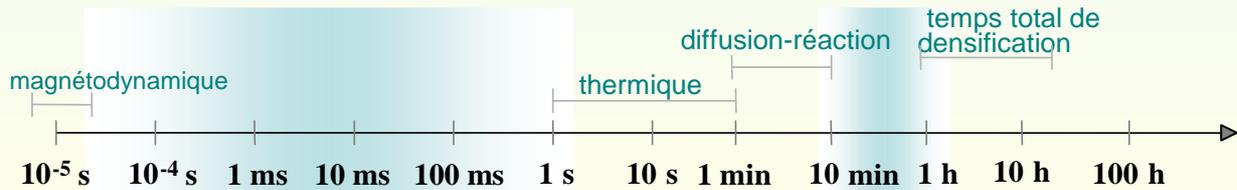


La TG-CVI : échelles

Echelles d'espace



Echelles de temps



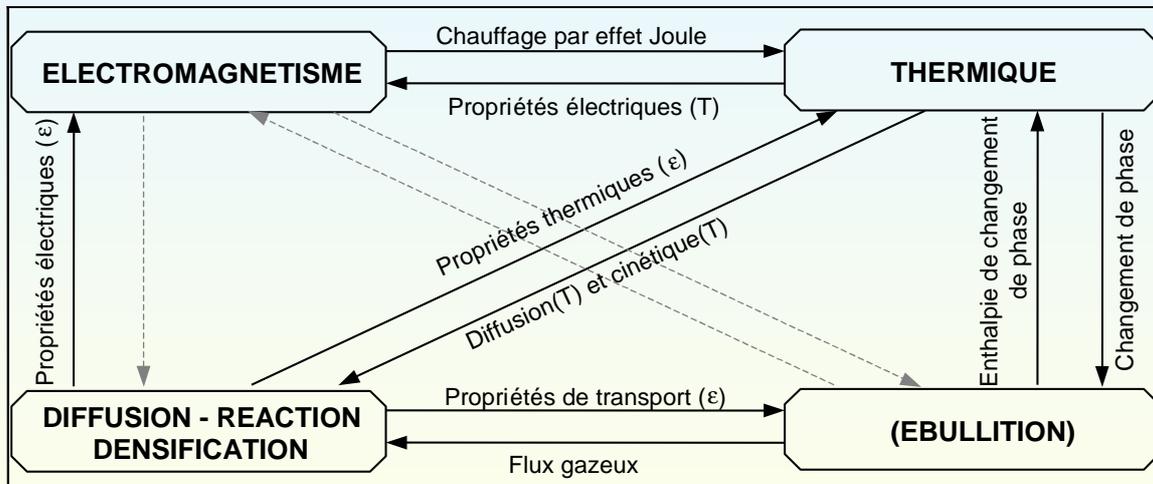
2 séparations



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



La TG-CVI : couplages



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



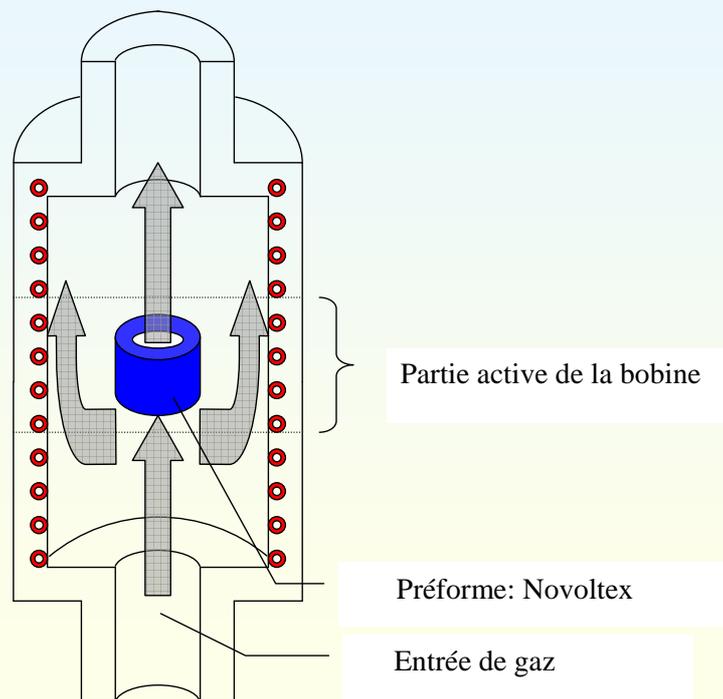
Etudes numériques : Deux variantes du procédé



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Etude de cas : RF-CVI CVI avec chauffage radiofréquence



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



La TG-CVI : modélisation

1. Induction électromagnétique

Equations de Maxwell

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho_e$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

+ Lois de comportement

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mathbf{E}$$

$$\mathbf{J} = \sigma_e \cdot \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H}$$

Définition d'un potentiel-vecteur

$$\mathbf{B} = \text{rot}(\mathbf{A})$$

+ condition de jauge

$$\text{div } \mathbf{A} = 0$$

+ régime quasi-stationnaire

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0$$

+ absence de charges fixes

$$\rho_e = 0$$

Equation sur A

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot } \mathbf{A} \right) + \sigma_e \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_s$$

Régime périodique :
Passage en nb. complexes

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot } \mathbf{A} \right) + j\omega \sigma_e \bar{\mathbf{A}} = \mathbf{J}_s$$

Equation à résoudre

\mathbf{J}_s = courant imposé dans l'inducteur

σ_e = conductivité électrique = $f(\epsilon)$



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



La TG-CVI : modélisation

1bis. Electrocinétique

Pas d'induction magnétique

$$\mathbf{E} = -\nabla V$$

V = potentiel électrique (scalaire)

+ absence de charges fixes

$$\rho_e = 0$$

Equation elliptique de l'électrocinétique

$$\text{div}(\sigma_e \cdot \nabla V) = 0$$

σ_e = conductivité électrique = $f(\epsilon)$



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



La TG-CVI : modélisation

2. Chauffage par effet Joule

$$Q_{th} = \frac{1}{\sigma_e} \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}$$

Chauffage inductif

$$Q_{th} = \frac{1}{2} \sigma_e \cdot \omega^2 \cdot \mathbf{A} \cdot \bar{\mathbf{A}}$$

Chauffage résistif

$$Q_{th} = \sigma_e |\nabla V|^2$$



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



La TG-CVI : modélisation

3. Transferts de chaleur

Equation de la chaleur :

Conduction/convection dans les solides, poreux et fluides

$$\underbrace{\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{terme instationnaire}} + \underbrace{\text{div}(-\lambda \nabla T)}_{\text{terme de conduction}} + \underbrace{\rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T}_{\text{terme de convection}} = \underbrace{Q_{th}}_{\text{terme source}}$$

Effet Joule

R_q : réaction chimique athermique

Props. thermiques = $f(\epsilon)$

Vitesses locales
À déterminer ...

Equations de Navier-Stokes
+ continuité

Radiation multiréflexion
À déterminer ...

Conditions aux limites :

Echanges convectifs et radiatifs

$$-\lambda \nabla T \cdot \mathbf{n} = \phi_{\text{conv_ambiante}} + \phi_{\text{ray_ambiante}} + \phi_{\text{multi refl}}$$

Calcul des
facteurs de forme



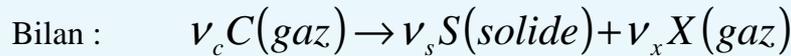
G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



La TG-CVI : modélisation

4. Transferts de masse

Réaction chimique hétérogène homogénéisée en milieu poreux



Expression :

Température calculée

$$R_c = -\sigma_v \cdot k_g(T) \cdot \frac{p_c}{\mathcal{R}T}$$

Pression partielle de précurseur
À déterminer ...

Surface interne = $f(\epsilon)$



Equation de bilan d'espèces

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon \cdot p_c}{\mathcal{R}T} \right) + \text{div} \cdot \mathbf{J}_c^t = R_c \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon \cdot p_x}{\mathcal{R}T} \right) + \text{div} \cdot \mathbf{J}_x^t = -\frac{\nu_x}{\nu_c} \cdot R_c \end{cases}$$

Flux des espèces = $f(\epsilon)$
À déterminer ...



G. L. VIGNOLES et al. - TGCVI - Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



La TG-CVI : modélisation

4. Transferts de masse (suite)

Flux d'espèces en milieu poreux : diffusion multicomposants + raréfié



Dusty-Gas Model (Mason et al., 1984)

Ecriture à deux espèces :

$$\begin{cases} \mathbf{J}_1^t = \left[-\frac{x_1 D_1^K D_2^K + D_1^K D_{12}}{x_1 D_2^K + D_{12} + x_2 D_1^K} \frac{\nabla p_1}{\mathcal{R}T} - \frac{x_1 D_1^K D_2^K}{x_1 D_2^K + D_{12} + x_2 D_1^K} \frac{\nabla p_2}{\mathcal{R}T} \right] - \frac{p_1}{\mathcal{R}T} \frac{k}{\mu^*} \nabla p \\ \mathbf{J}_2^t = \left[-\frac{x_2 D_1^K D_2^K}{x_1 D_2^K + D_{12} + x_2 D_1^K} \frac{\nabla p_1}{\mathcal{R}T} - \frac{x_2 D_1^K D_2^K + D_2^K D_{12}}{x_1 D_2^K + D_{12} + x_2 D_1^K} \frac{\nabla p_2}{\mathcal{R}T} \right] - \frac{p_2}{\mathcal{R}T} \frac{k}{\mu^*} \nabla p \end{cases}$$

Diffusivité de Knudsen

Interdiffusion des gaz

Perméabilité Darcéenne

$$D_i^K = \frac{1}{3} \frac{\epsilon}{\eta_K(\epsilon)} \sqrt{\frac{8 \cdot \mathcal{R}T}{\pi M_i}} \cdot d_p(\epsilon)$$

$$D_{12} = \frac{\epsilon}{\eta_b(\epsilon)} \frac{0,00266 \cdot 10^{-4} T^{3/2}}{p_{bar} \sqrt{M_{12} \sigma_{12}^2 \Omega_d}}$$

$$k = \frac{\epsilon}{\eta_v(\epsilon)} \frac{d_p^2(\epsilon)}{32}$$

Diamètre des pores et tortuosité = $f(\epsilon)$



G. L. VIGNOLES et al. - TGCVI - Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



La TG-CVI : modélisation

5. Densification

Réaction chimique hétérogène de dépôt => réduction de porosité

$$-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{M_s v_s}{\rho_s v_c} R_c$$

$$\frac{M_s v_s}{\rho_s v_c} \ll 1$$



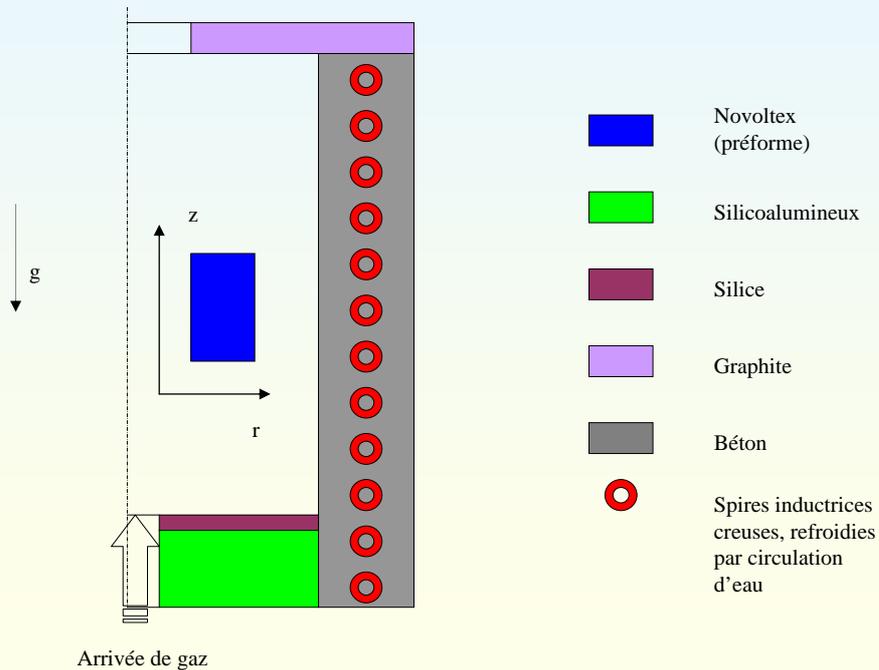
Découplage en temps : les *autres* équations pourront être traitées en *pseudo-stationnaire*



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



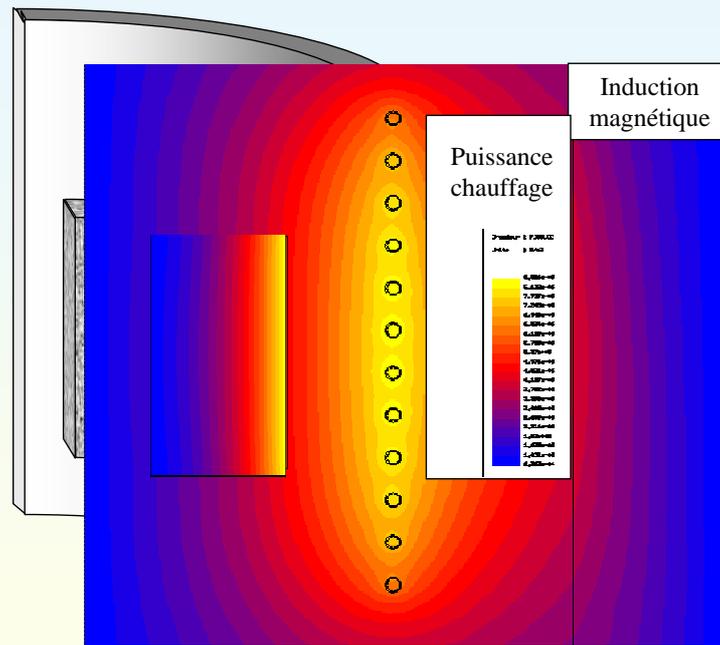
Etude de cas : RF-CVI CVI avec chauffage radiofréquence



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



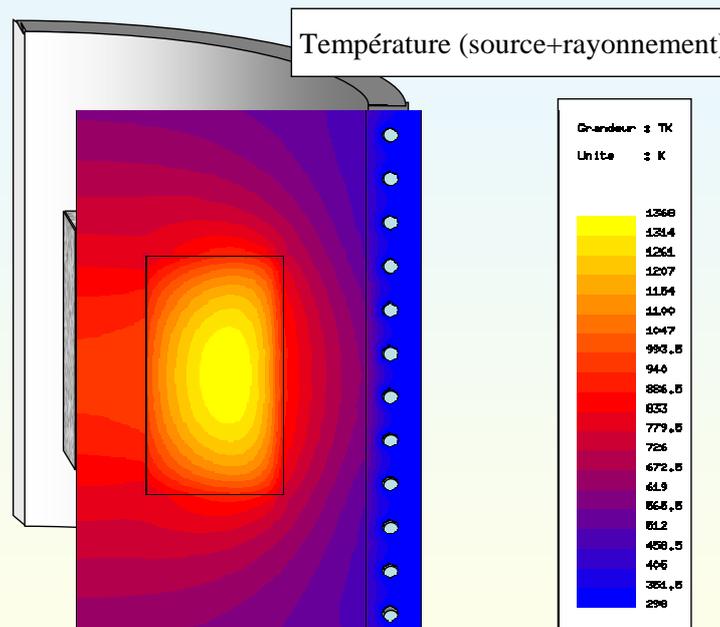
Etude de cas : RF-CVI



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Etude de cas : RF-CVI

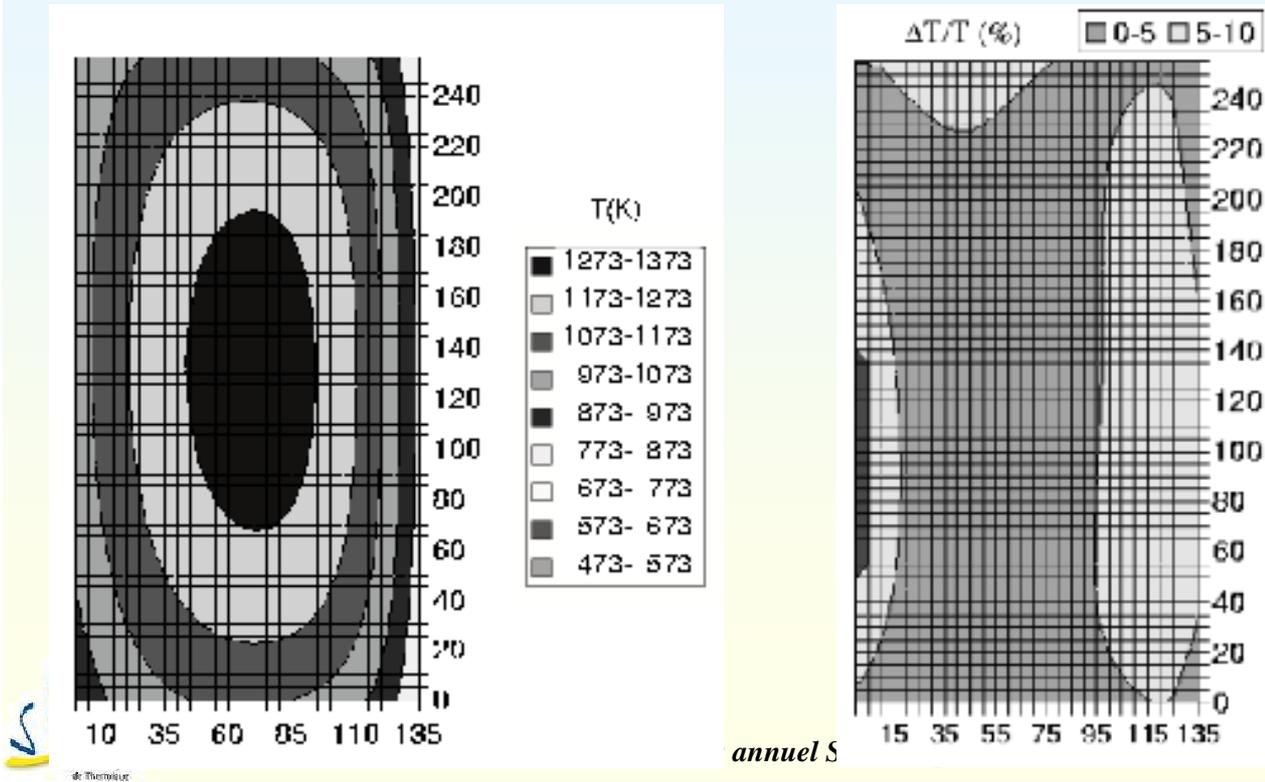


G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011

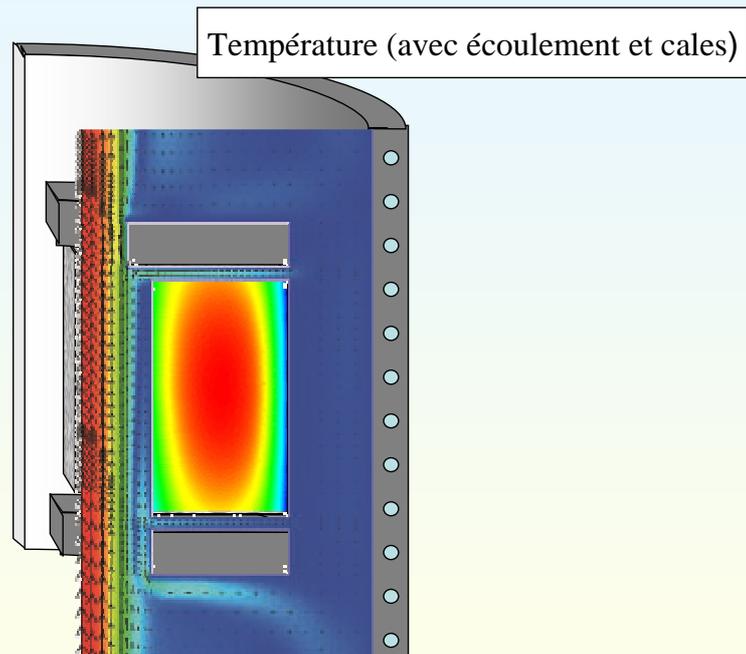


Etude de cas : RF-CVI

Validation du calcul thermique vis-à-vis des mesures expérimentales



Etude de cas : RF-CVI

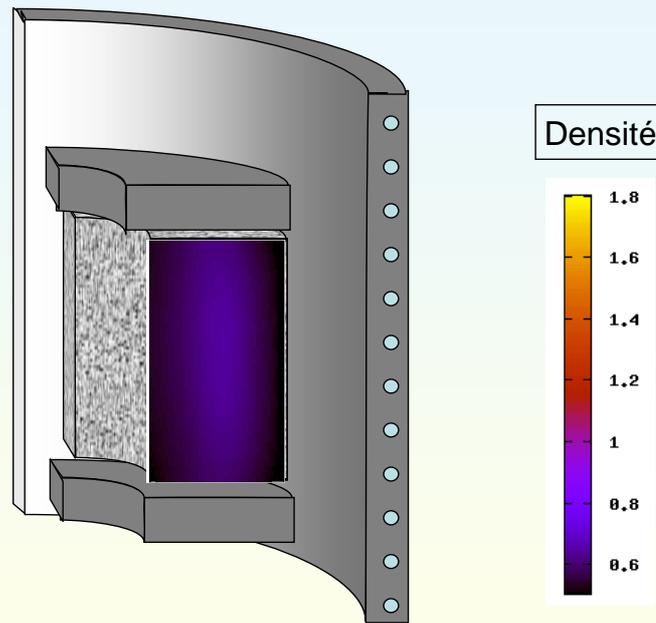


Ajout de cales et introduction de l'écoulement des gaz vers le haut

G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Etude de cas : RF-CVI

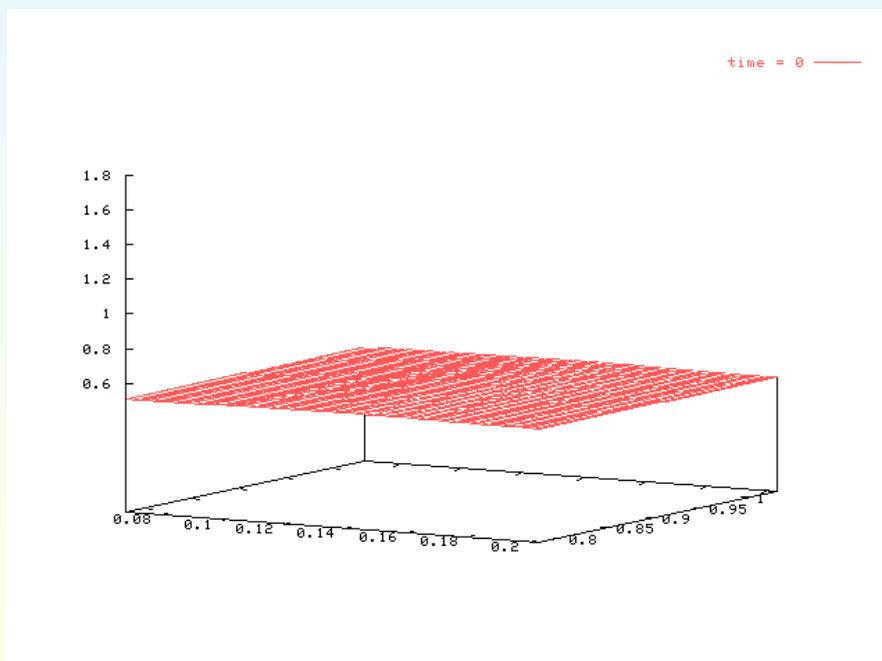


G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Etude de cas : RF-CVI

Évolution du champ de densité dans une section avec le temps



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



MODELISATION DIRECTE FOUR-PREFORME

Application au procédé à gradient de température par couplage direct (RF-CVI)

☆ Compréhension des **mécanismes** :

- une **première phase** de densification par l'intérieur
- la zone densifiée conduit mieux la chaleur => elle « tue » le gradient
- il apparaît une zone à **densité non optimale** !
- mise en place d'un **front de densification** => pourquoi ?

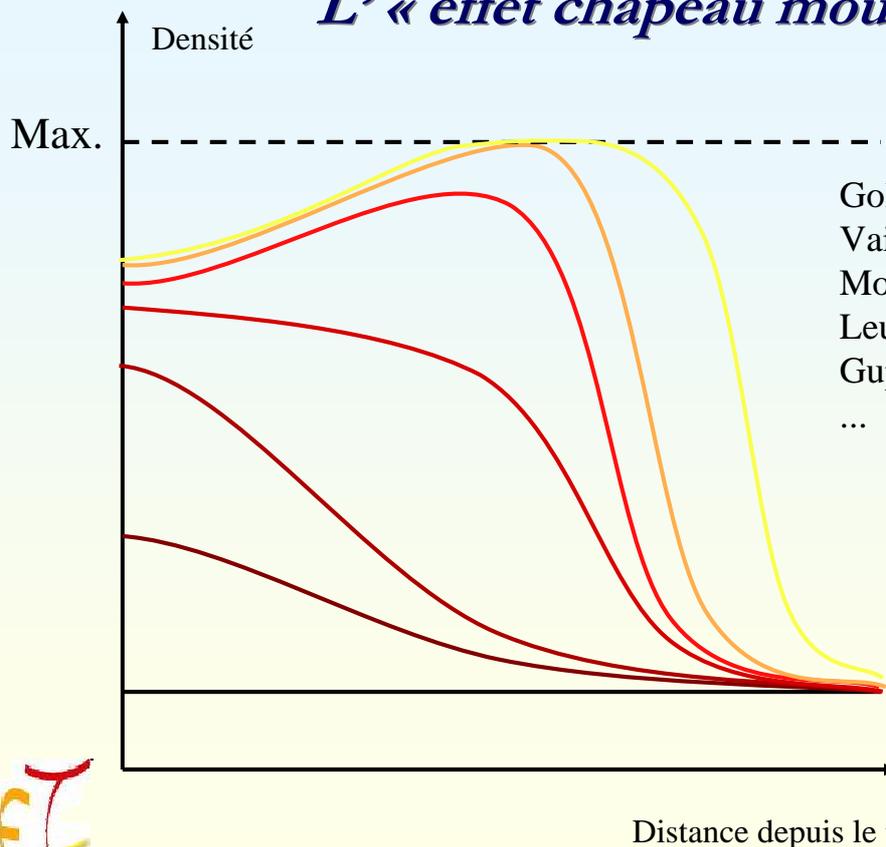
☆ Tendances expérimentales retrouvées



G. L. VIGNOLES *et al.* – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



L' « effet chapeau mou »



Rapporté par :

Golecki *et al.* (rapid process)
Vaidyaraman *et al.* (F-CVI)
Morell *et al.* (RF-CVI)
Leutard *et al.* (RF-CVI)
Gupta *et al.* (MW-CVI)
...

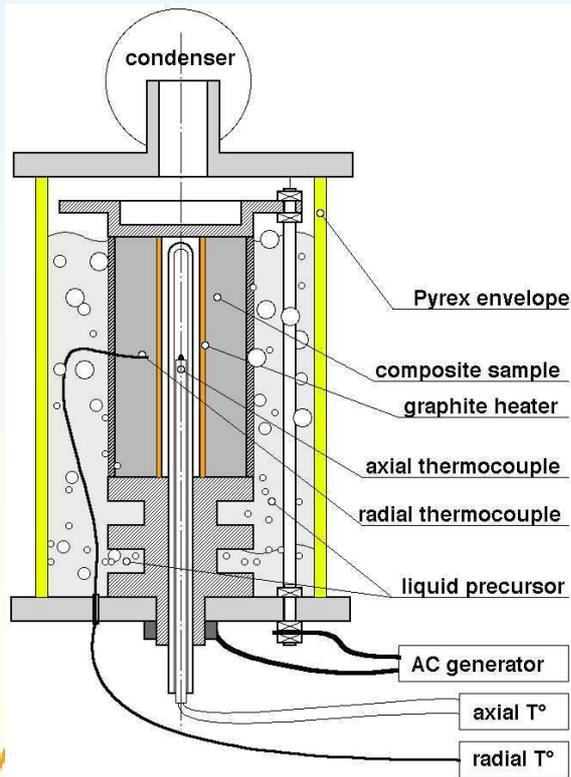
Soit dans les calculs
Soit dans les expériences
Soit dans les deux ...



G. L. VIGNOLES *et al.* – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011

MODELISATION DU PROCEDE KALAMAZOO

Dispositif expérimental (CRPP)



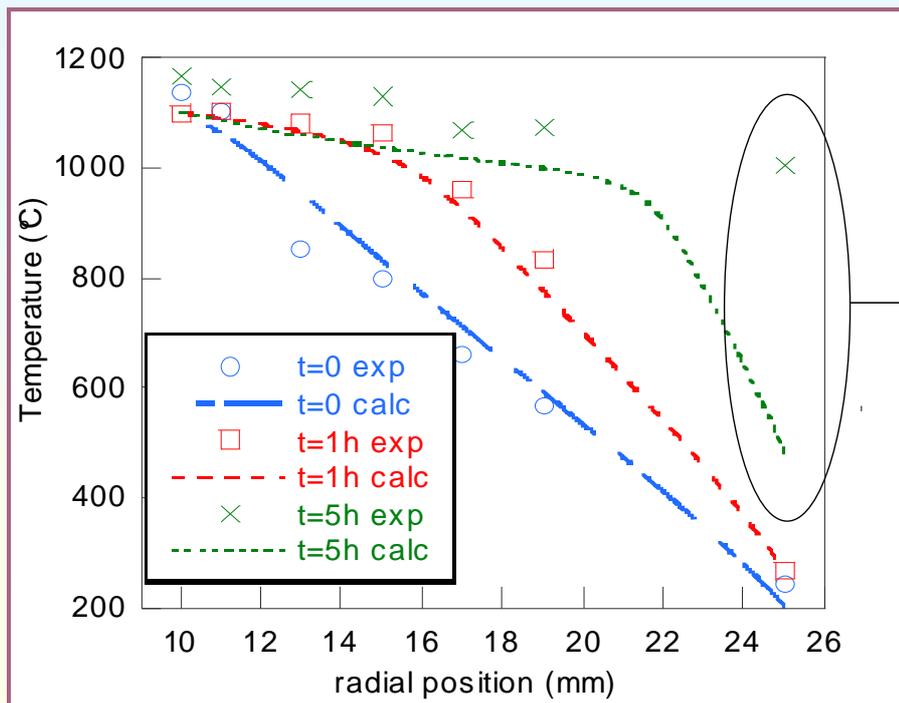
- $P_{max} = 3 \text{ kW}$
- $I \approx 500 \text{ A}$
- $d = 50 \text{ mm}$, $h = 100 \text{ mm}$
- Chauffage résistif

- 6 thermocouples
- radiographies X

- RVC 2000 ou Novoltex
- 1100°C
- 2 couches de Goretex

MODELISATION DU PROCEDE KALAMAZOO

Validation expérimentale : répartition de température

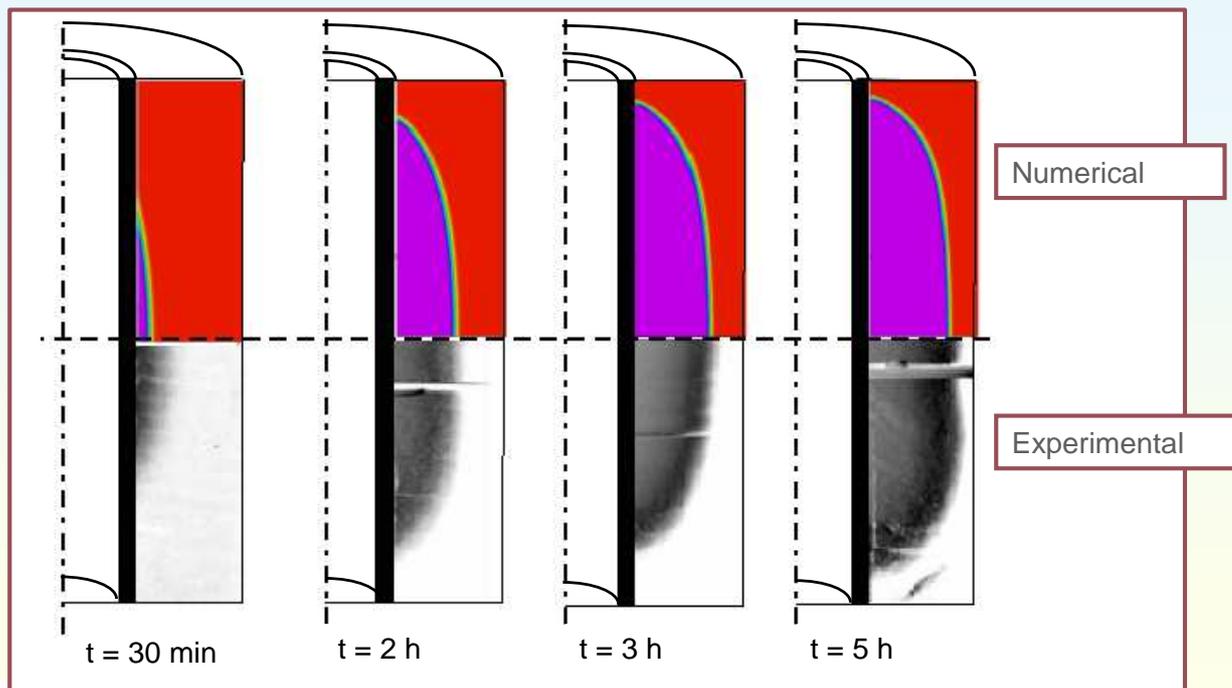


Ebullition externe non modélisée



MODELISATION DU PROCEDE KALAMAZOO

Comparaison des champs de densité numériques et expérimentaux



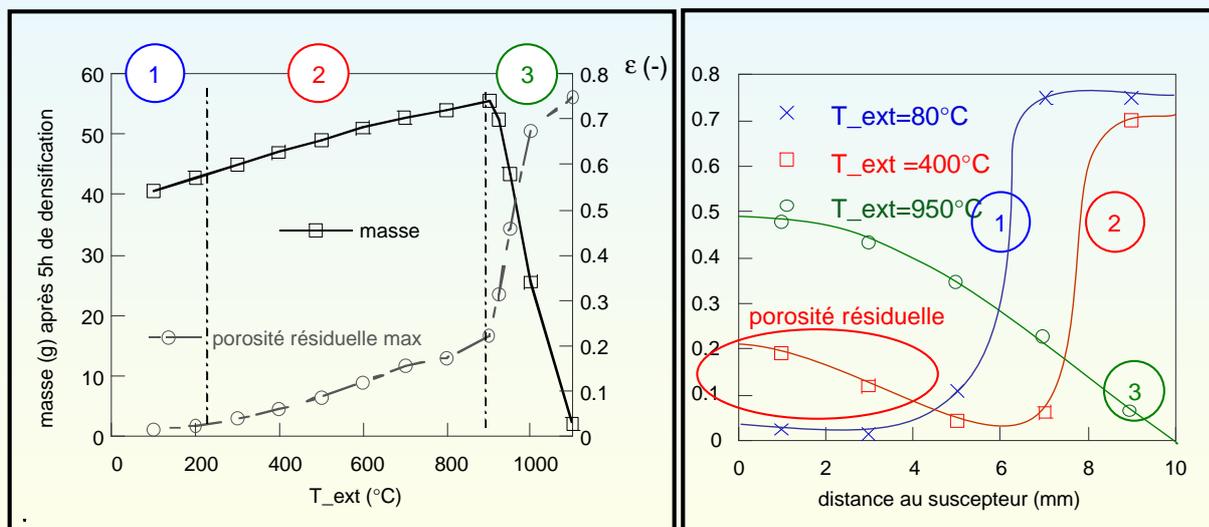
[Vignoles et al., Chem. Eng. Sci. 2006]

G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



MODELISATION DU PROCEDE KALAMAZOO

Optimisation du gradient thermique



Trois comportements - type

J.-F. Lines et al. , Congrès SF2M, Nancy 2003

G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011





Etude mathématique : Front d'infiltration



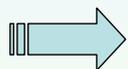
G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Etude locale des fronts de densification

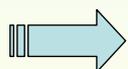
Principe :

Lorsqu'un front existe, on peut le considérer « mince » par rapport à la pièce à densifier



Découplage entre :

- ★ une étude « locale » du front
- ★ une étude de sa propagation



Production de modèles simplifiés, quasi-analytiques



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Construction du modèle local: choix des variables

La réaction de dépôt dépend fondamentalement de trois facteurs :

$$R(x, t) = \sigma_v(\varepsilon) k(T) C^\alpha$$

La surface interne
variant avec la porosité, ε

La température T à travers
une loi d'Arrhenius

La concentration en gaz précurseur, C



Trois variables (au minimum) sont nécessaires pour décrire la zone de réaction.

G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Construction du modèle local : lois

On choisit des lois simplifiées pour les coefficients,
représentant *l'influence du milieu poreux* :

$$\rho C_p(\varepsilon) = (1 - \varepsilon) \rho C_{p,0}$$

$$\lambda(\varepsilon) = (1 - \varepsilon) \lambda_0$$

$$D(\varepsilon) = \varepsilon^{m+1} D_0$$

$$\sigma_v(\varepsilon) = A \varepsilon^{1/n}$$

Les modèles pour D et σ_v
sont particulièrement importants pour
la nature et le comportement du front
surtout pour la partie $\varepsilon \Rightarrow 0$

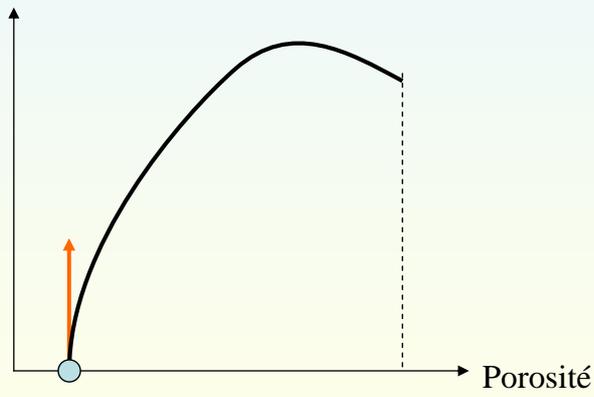


G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



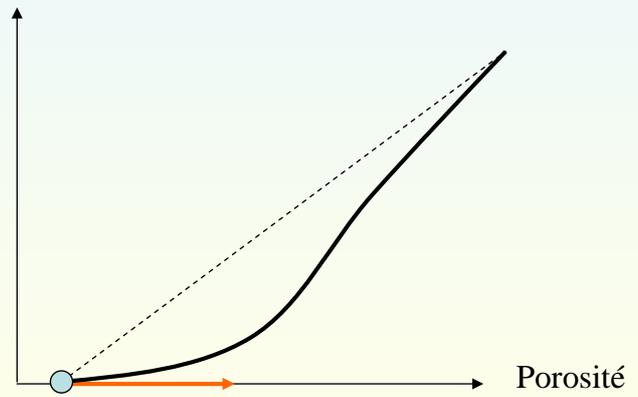
Construction du modèle : les phénomènes physico-chimiques

la surface interne



Porosité de percolation Porosité initiale

la diffusivité effective



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Construction du modèle local

Recherche d'une solution « onde progressive »

C'est une solution qui se propage à la vitesse \tilde{v} , $v > 0$, et qui est donc stationnaire dans les coordonnées $\tilde{x} = x - vt$, $\tilde{t} = t$ (on omet les tildes).



Cette vitesse n'apparaît explicitement que dans l'équation de densification



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Construction du modèle local

Le système stationnaire

$$-\lambda_0(1-\varepsilon)\frac{dT}{dx} = q$$

Flux de chaleur

$$\frac{d}{dx}\left(-\varepsilon^{m+1}D_0\frac{dC}{dx}\right) = -Ak(T_{ref})\varepsilon^{1/n}f(T)C$$

$$v\frac{d\varepsilon}{dx} = \Omega_s Ak(T_{ref})f(T)C$$



L'équation de la chaleur a été intégrée.

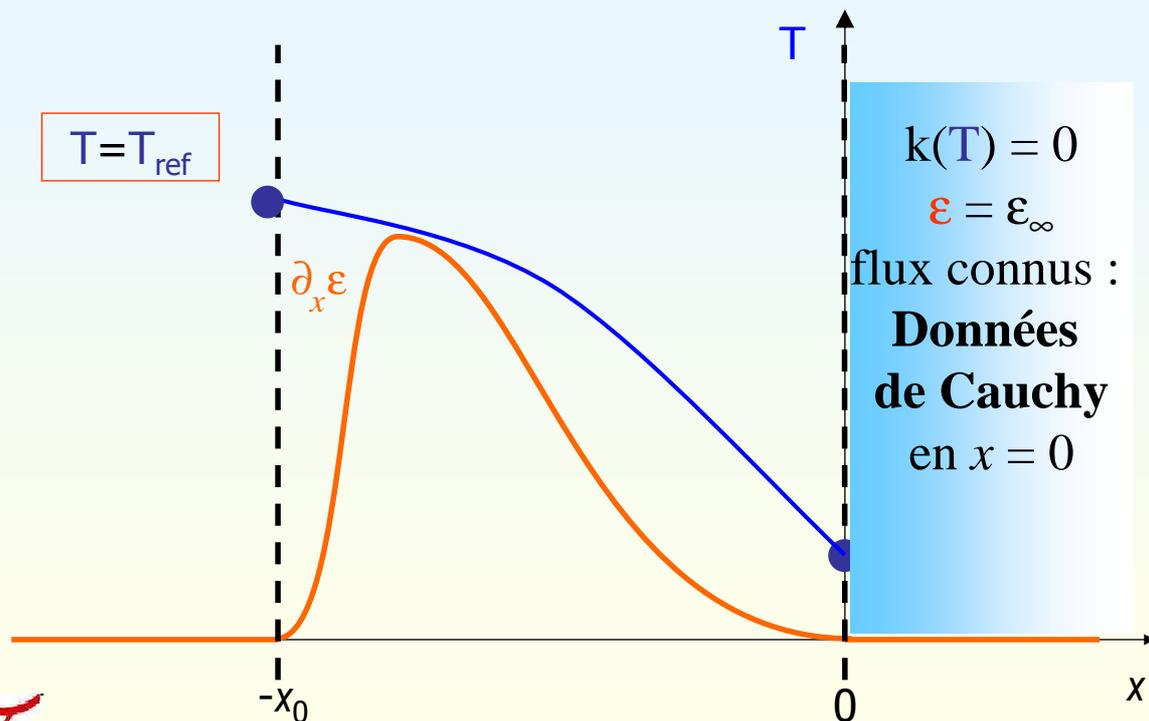


G. L. VIGNOLES et al. - TGCVI - Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Construction du modèle local

Domaine spatial

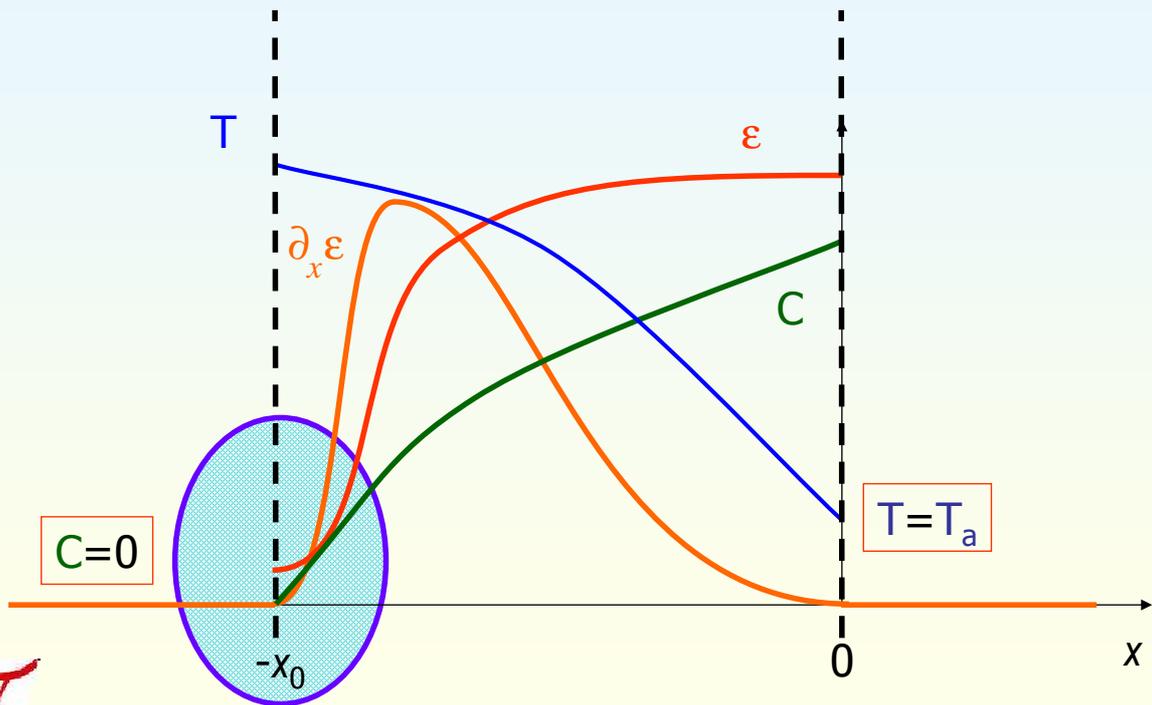


G. L. VIGNOLES et al. - TGCVI - Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011





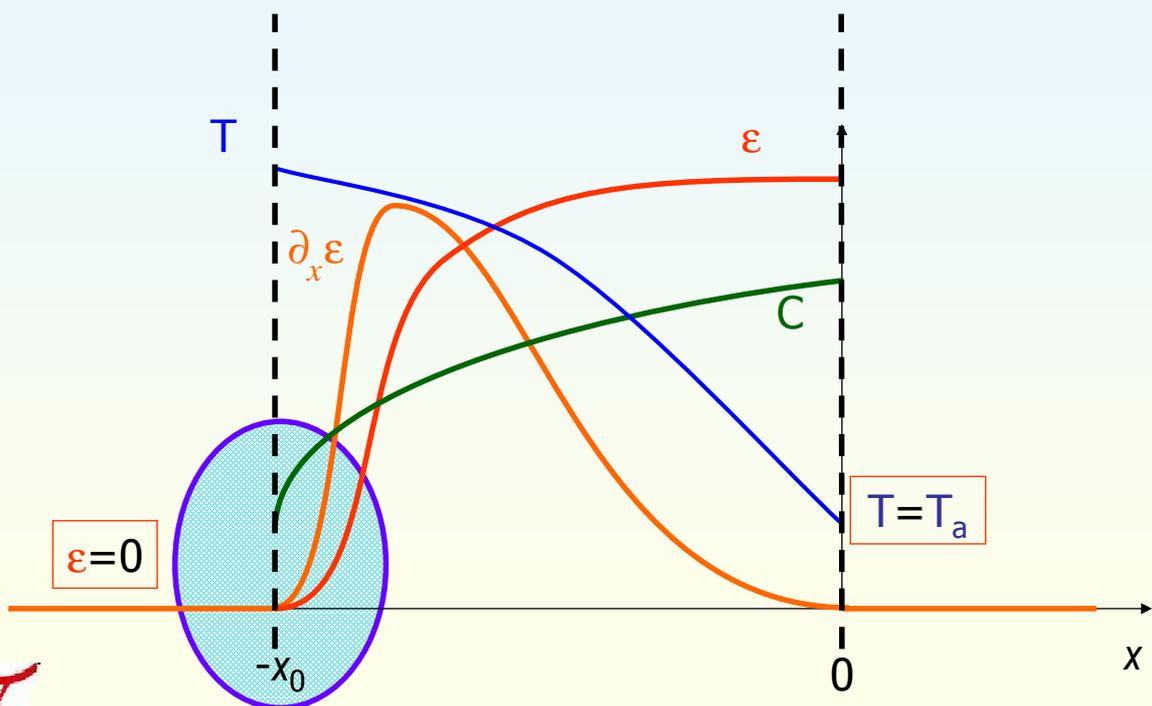
Front d'appauvrissement



G. L. VIGNOLES et al. - TGCVI - Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Front de densification complète



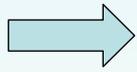
G. L. VIGNOLES et al. - TGCVI - Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011





Modèle de front 1D : étude mathématique

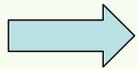
3 E.D.O. avec 6 conditions aux bords = problème *sur-déterminé*



N'a de solution que si les paramètres obéissent à certaines relations
« **Problème aux valeurs propres** »

Ou encore :

« **Problème de tir** »



Production d'un **critère d'existence du front**



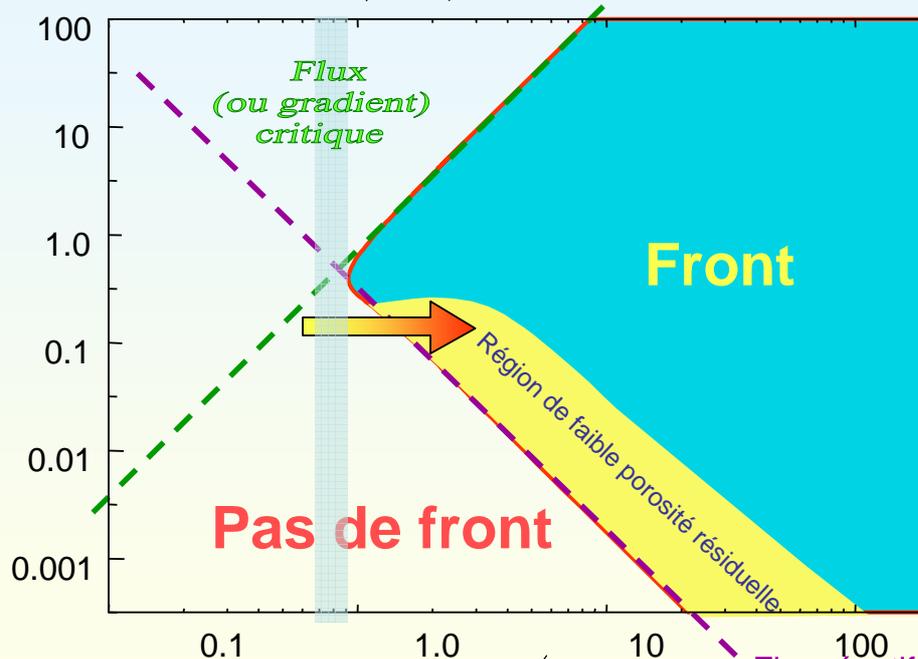
G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Modèle de front 1D : étude mathématique

Diagramme d'existence du front

Flux massique adimensionné $\frac{J}{C_0 \sqrt{D_0 A k (T_h)}}$ Flux diffusif maximum



$$J(0) \propto \frac{C_{\text{ref}} D_0}{L_{\text{ref}}}$$

avec

$$A \approx \frac{4}{d_f}$$

$$J(0) \propto C_{\text{ref}} A k (T_h) L_{\text{ref}}$$

N. Nadeau et al., Chem. Eng. Sci 2006



Flux thermique adimensionné $\frac{q}{\frac{\lambda_0 \mathfrak{R} T_h^2}{E_a} \sqrt{\frac{A k (T_h)}{D_0}}}$

G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011





Modèle de front 1D : étude mathématique

Largeur du front :

$$x_f = L_{ref} \xi_f = \frac{\lambda_0 \mathcal{R} T_h^2}{E_a q} \xi_f \quad \xi_f \gtrsim 1.15$$

Vitesse du front :

$$v = 0.3 \kappa A k(T_h) L_{ref} \quad \kappa = \frac{C_c M_s}{\rho_s}$$

Flux critique :

$$q \gtrsim \frac{\lambda_0 \mathcal{R} T_h^2}{E_a} \sqrt{\frac{A k(T_h)}{D_0}} \quad \text{i.e. } \Phi < 1$$

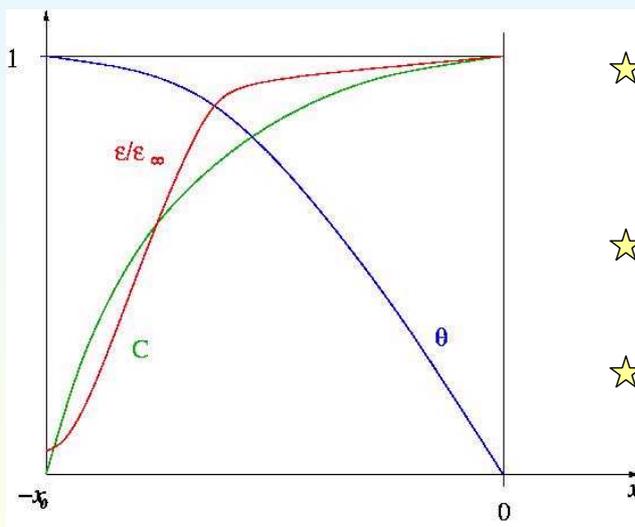


G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



ETUDE THEORIQUE DU FRONT DE DENSIFICATION

Dépendance aux paramètres



- ★ La **vitesse** et la **largeur** varient
 - en inverse de l'énergie d'activation
 - en inverse du flux de chaleur
- ★ La **porosité résiduelle** peut être faible, si le flux de masse est optimal
- ★ La **vitesse** dépend aussi
 - de la cinétique chimique
 - de l'évolution de la surface en fonction de la porosité

Structure du front



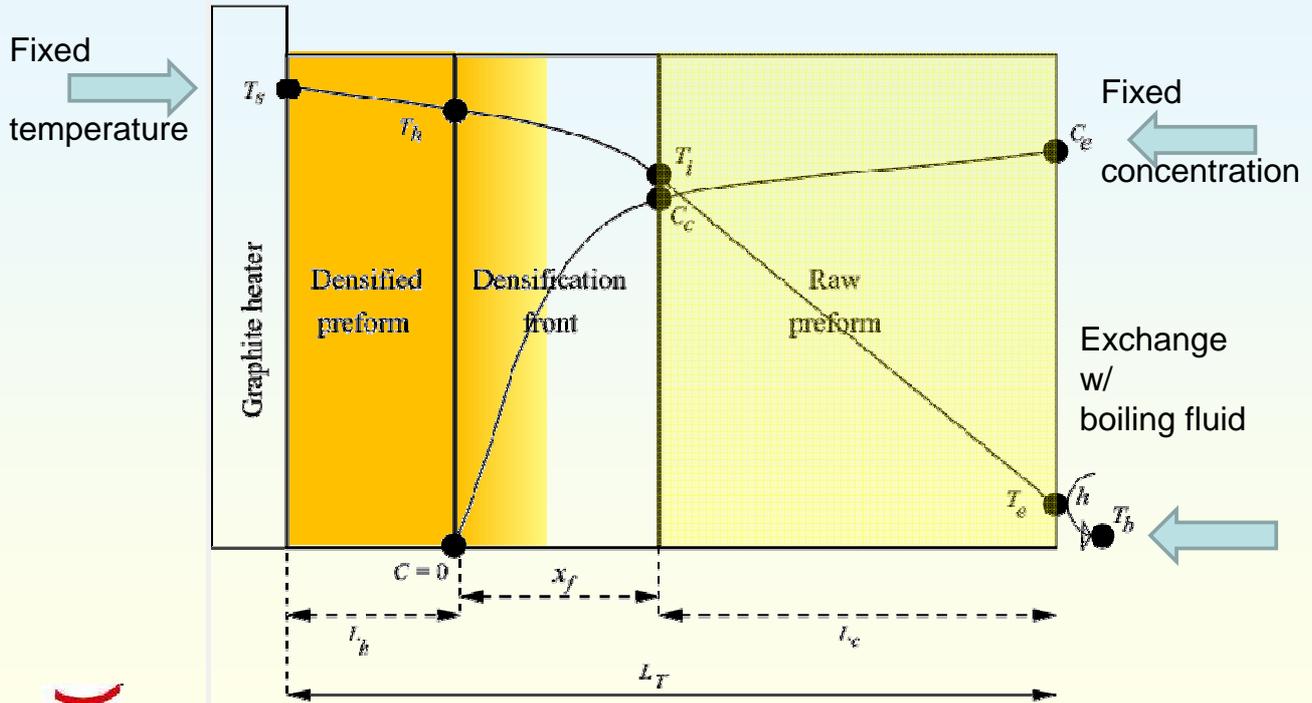
Similitudes et différences avec les fronts de combustion

N. Nadeau et al., Journées Milieux Poreux, Toulouse 2003



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011

Exploitation du modèle simplifié



Exploitation du modèle simplifié

Zone froide :

$$\begin{cases} L_c = L_T - L_h - x_f, \\ q = \frac{\lambda_c(T_i - T_e)}{L_c}, \\ J_c = \frac{D_0 \varepsilon_c^{m+1} (C_e - C_c)}{L_c}, \\ C_e = P_{tot} / (\mathcal{R} T_e), \\ T_e = T_b + q/h, \end{cases}$$

Zone du front :

$$\begin{cases} J_c = (\kappa \bar{J}_c) C_c A k(T_h) \lambda_0 T_h^2 \frac{\mathcal{R}}{E_a q}, \\ v = \omega V_m C_c A k(T_h) \lambda_0 T_h^2 \frac{\mathcal{R}}{E_a q}, \\ x_f = \xi_f \lambda_0 T_h^2 \frac{\mathcal{R}}{E_a q}. \end{cases}$$

Zone chaude (t=0) :

$$\begin{cases} T_h^0 = T_s, \\ L_c^0 = L_T - x_f^0, \\ q^0 = \frac{\lambda_c(T_i - T_e)}{L_T - x_f^0}, \\ J_c^0 = \frac{D_0 \varepsilon_c^{m+1} (C_e - C_c)}{L_T - x_f^0}, \end{cases}$$

Intégration explicite :

$$L_h^i = L_h^{i-1} + v^{i-1} \Delta t.$$

Mise à jour des quantités :

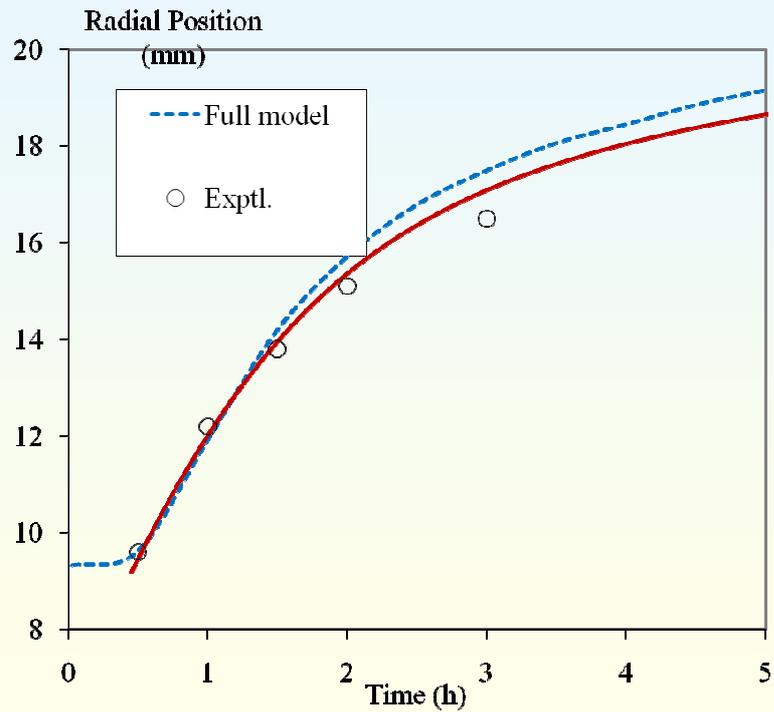
$$\begin{cases} T_e^i = T_b + q^i/h, \\ q^i = \lambda_c \frac{T_i - T_e^i}{L_T - x_f^i - L_h^i}, \\ x_f^i = \frac{\lambda_0 \mathcal{R} (T_h^i)^2}{E_a q^i} \cdot \xi_f, \\ T_h^i = T_s - \frac{l_h^i q^i}{\lambda_h}, \\ \begin{cases} C_e^i = P_{tot} / (\mathcal{R} T_e^i), \\ J_c^i = \frac{\lambda_0 \mathcal{R} (T_h^i)^2}{E_a q^i} V_m (C_c^i)^2 A k(T_h^i) \cdot \bar{J}_c, \\ C_c^i = C_e^i - \frac{J_c^i}{D_0 \varepsilon_c^{m+1}} (l_t - x_f^i - l_h^i). \end{cases} \end{cases}$$



ETUDE THEORIQUE DU FRONT DE DENSIFICATION

Exploitation du modèle simplifié

BON
ACCORD !



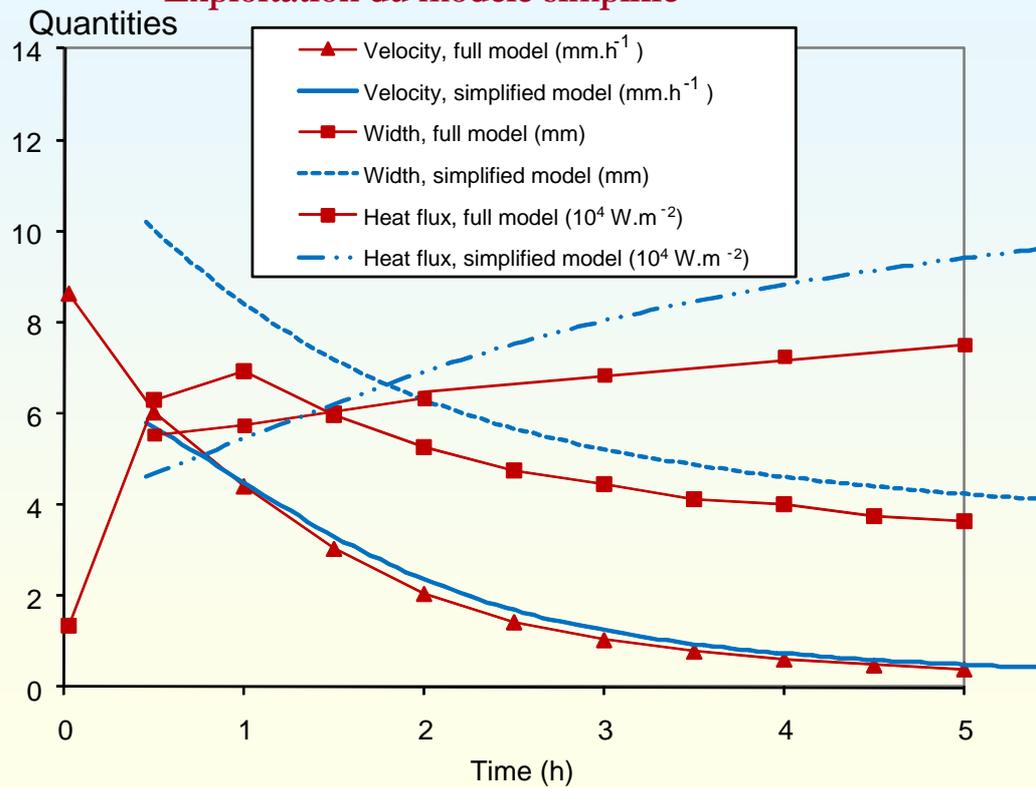
15-16 Juin 2010 G. L. VIGNOLES et al. - TGCVI - Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



ETUDE THEORIQUE DU FRONT DE DENSIFICATION

Exploitation du modèle simplifié

BON
ACCORD
surtout
sur
vitesses

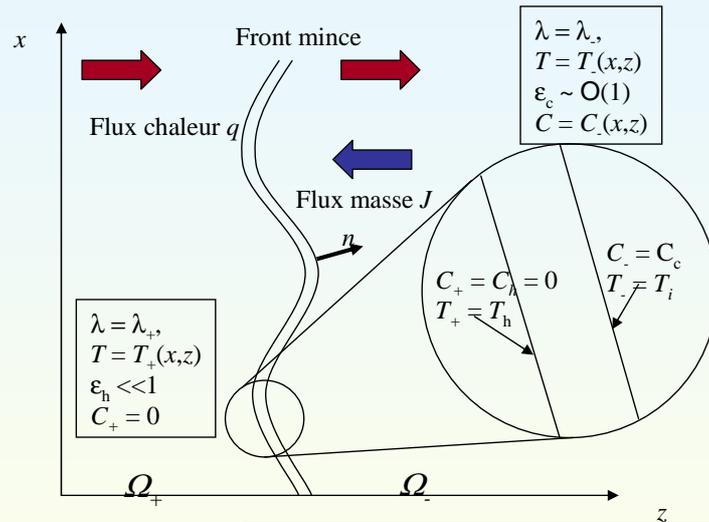


G. L. VIGNOLES et al. - TGCVI - Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Modèle de front : étude de la stabilité transversale

Approximation en « front mince »



+ Equation de propagation du front (Hamilton-Jacobi)

+ Equations de bilan de chaleur et de précurseur, flux prescrits

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{M_s v_s}{\rho_s v_c} \sigma_V(\epsilon_c) C_c k(T_h) \sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2} \cdot \frac{\lambda R T_h^2}{E_a q}$$

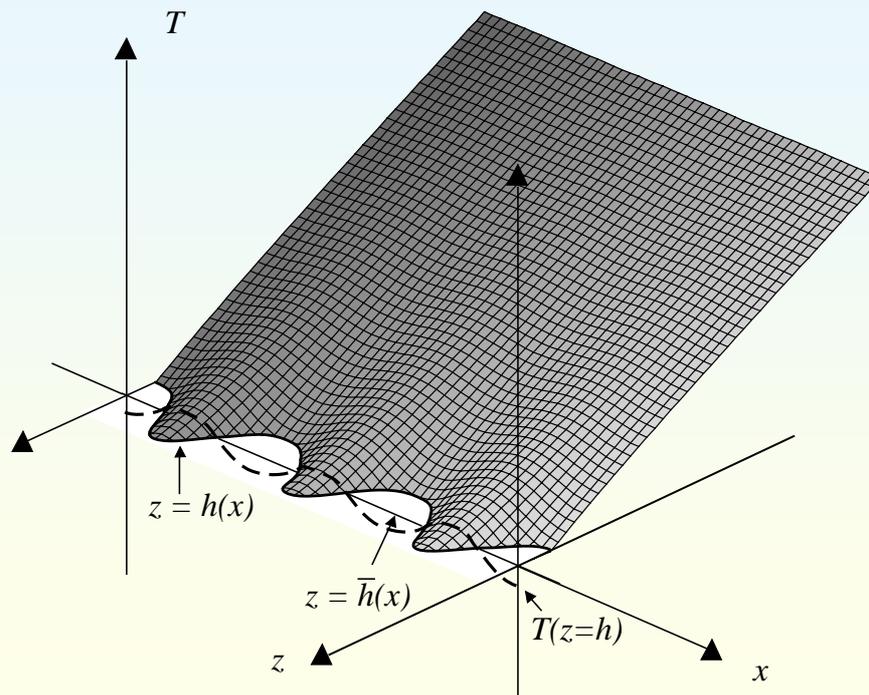


G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Modèle de front : étude de la stabilité transversale

Etude analytique de perturbations sinusoïdales liées (T, C et h)

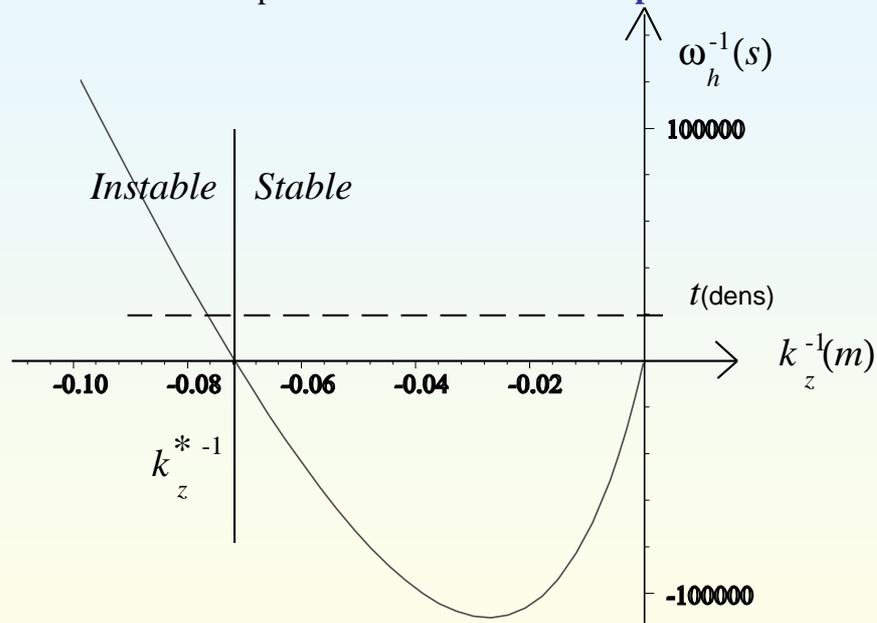


G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Modèle de front : étude de la stabilité transversale

Résultat de l'étude de perturbation : **courbe de dispersion**



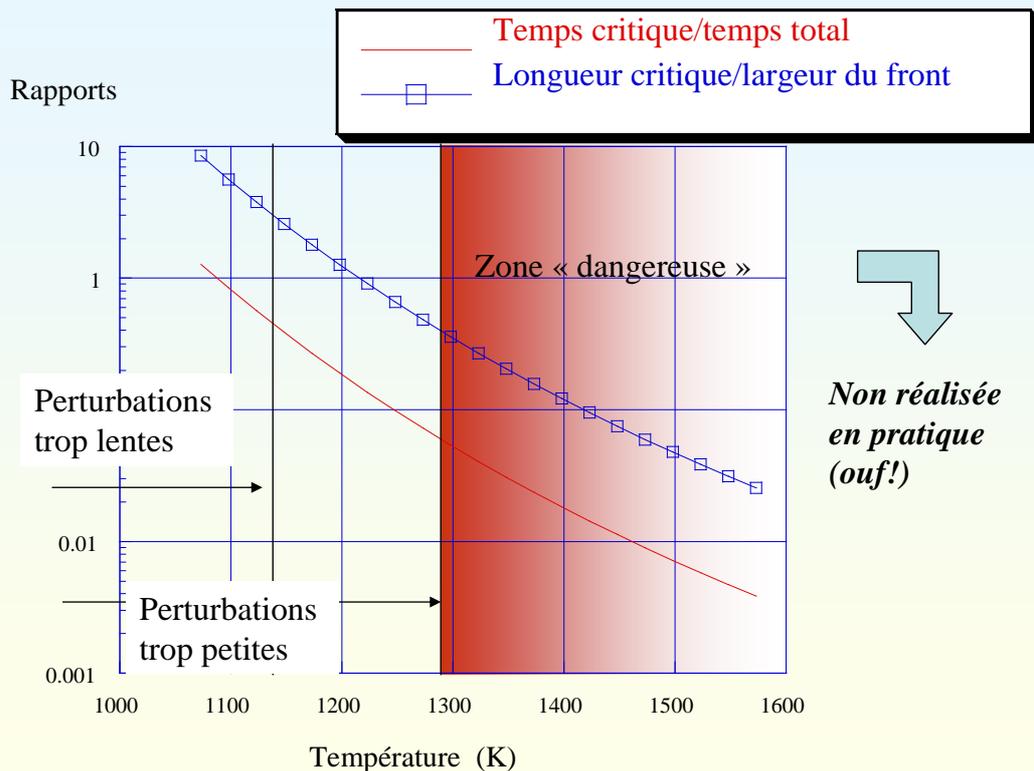
Seules les grandes perturbations peuvent croître !



G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Modèle de front : étude de la stabilité transversale



Non réalisée en pratique (ouf!)



G. L. VIGNOLES, R. DUCLOUS and S. GAILLARD, *Chem. Eng. Sci.* vol. **62** (2007), pp. 6081–6089

G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



Transferts en milieu poreux : approches numériques

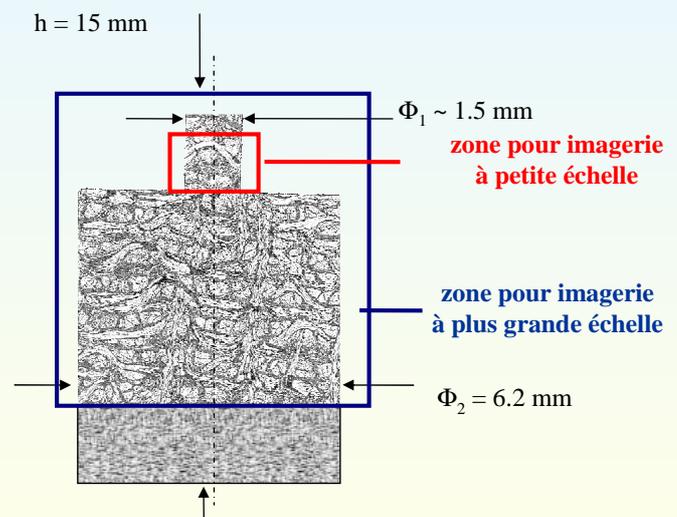


G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011



ACQUISITION D'IMAGES

Géométrie de l'échantillon pour une acquisition à 2 résolutions



O. COINDREAU and G. L. VIGNOLES, *J. Mater. Res.* vol. 20 (2005), pp. 2328-2339

G. L. VIGNOLES et al. – TGCVI – Congrès annuel SFT, Perpignan, 24 Mai 2011