MODÈLES PHYSIQUES MINIMAUX & OPTIMISATION POUR L'ÉLABORATION DU VERRE

13/04/2023

Kevin Lippera – David Bousquet

Saint-Gobain Research Paris

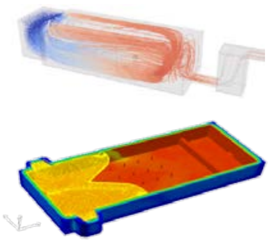
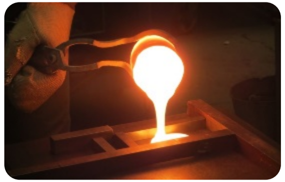
TRANSVERSAL R&D CENTERS BY SAINT-GOBAIN

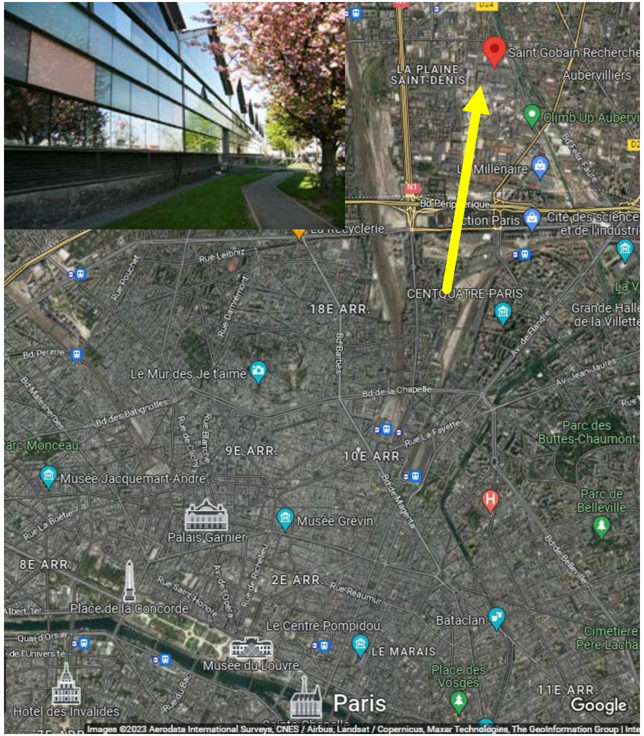
SAINT-GOBAIN

SAINT-GOBAIN RESEARCH PARIS

TRANSVERSAL R&D CENTERS BY SAINT-GOBAIN

Département Elaboration des Verres

Procédés de fusion	Physique de la fusion	Formulation et qualité
		



MODÈLES PHYSIQUES MINIMAUX

Défis pour l'élaboration du verre à Saint-Gobain : optimisation des procédés, recherche de design optimal, contrôle optimal

Modèle physique minimal pour le contrôle en temps réel des procédés

Modèle physique minimal pour la recherche de design optimal

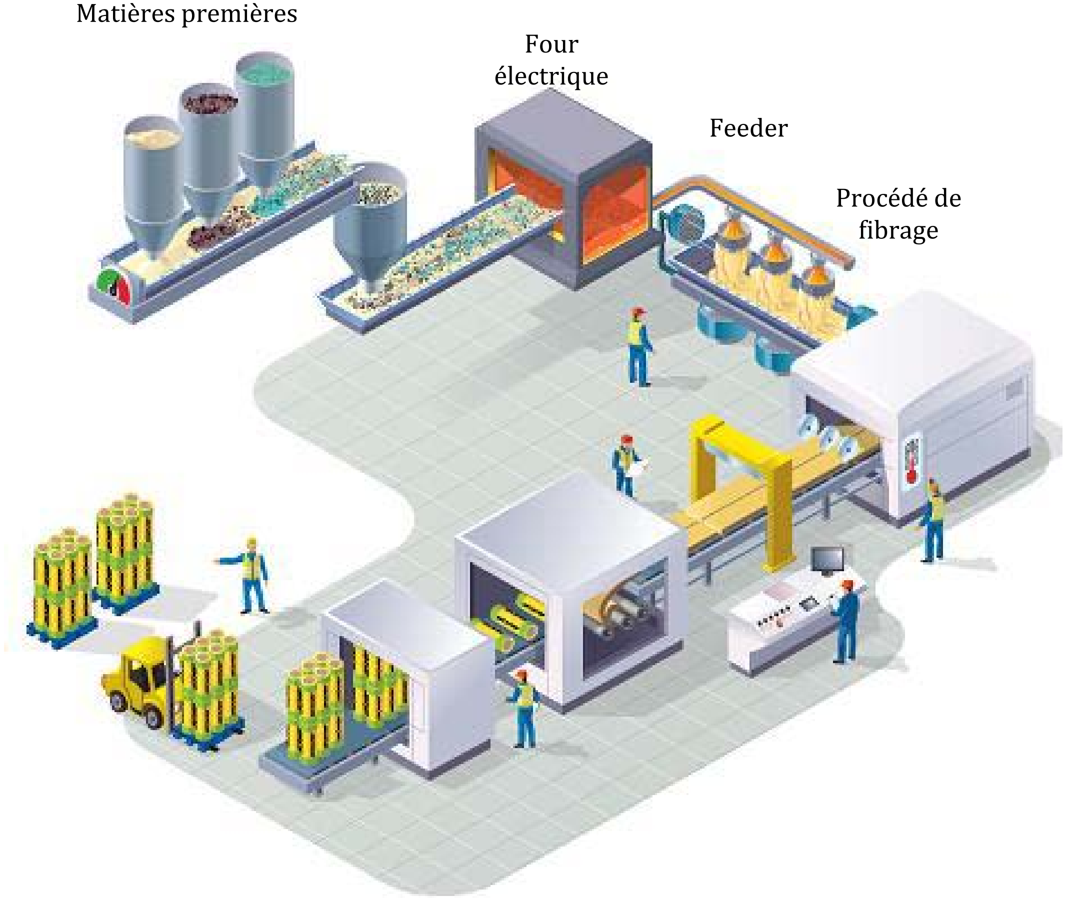
MODÈLES PHYSIQUES MINIMAUX

Défis pour l'élaboration du verre à Saint-Gobain : optimisation des procédés, recherche de design optimal, contrôle optimal

Modèle physique minimal pour le contrôle en temps réel des procédés

Modèle physique minimal pour la recherche de design optimal

ELABORATION DU VERRE ISOLATION (LAINE DE VERRE)

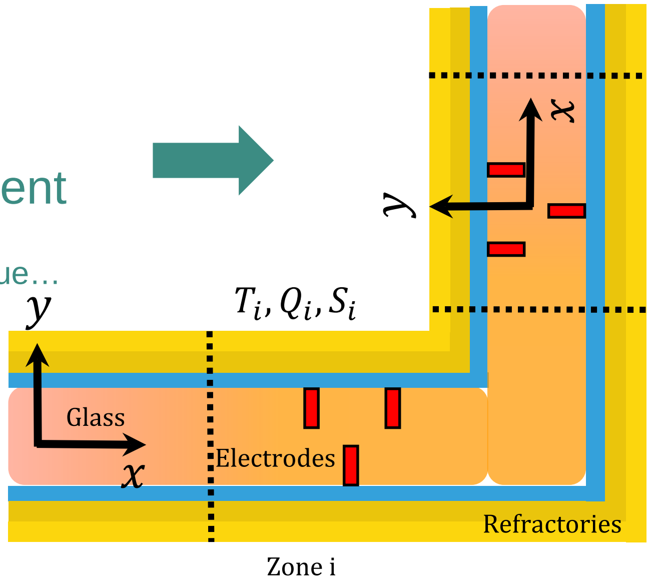


MODÈLE PHYSIQUE MINIMAL *REAL TIME CONTROL*

Modèle physique

Point de fonctionnement

Débit gaz, tirée,
puissance électrique…

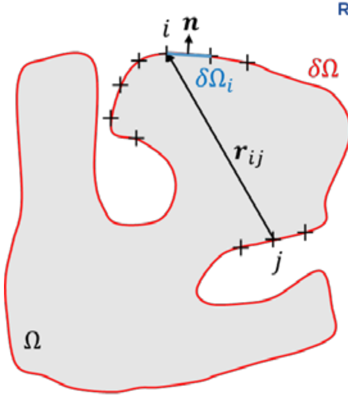


Outputs industriels

Distribution de temperature, consomation d'énergie,

Objectif: contrôle optimal des inputs de puissance (électrodes, bruleurs) pour garantir une bonne stabilité de la température en entrée du procédé de fibrage !

PERTES THERMIQUES À TRAVERS LES RÉFRACTAIRES



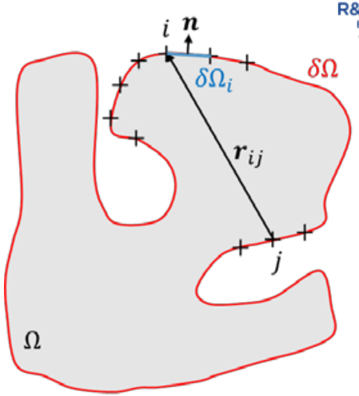
Problème stationnaire

$$\nabla \cdot (\lambda(T)\, \nabla T) = 0$$

Non-linéaire : pas très pratique

PERTES THERMIQUES À TRAVERS LES RÉFRACTAIRES

TRANSVERSAL R&D CENTERS BY SAINT-GOBAIN



Problème stationnaire

$$\boldsymbol{\nabla} \cdot (\lambda(\mathrm{T})\, \boldsymbol{\nabla}\, \mathrm{T}) = 0$$

Non-linéaire : pas très pratique

Transformation de Kirchhoff

$$\theta = \mathrm{K}\{T\} = T^* + \frac{1}{\lambda^*}\int_{T^*}^{T} \lambda(T)\,dT$$

Changement de variable

Bagnall K et al. (2013). *Application of the Kirchhoff transform to thermal spreading problems with convection boundary conditions.*

PERTES THERMIQUES À TRAVERS LES RÉFRACTAIRES

Problème stationnaire

$$\nabla \cdot (\lambda(T)\, \nabla T) = 0$$

Non-linéaire : pas très pratique

Transformation de Kirchhoff

$$\theta = K\{T\} = T^* + \frac{1}{\lambda^*}\int_{T^*}^{T} \lambda(T)\,dT$$

Bagnall K et al. (2013). *Application of the Kirchhoff transform to thermal spreading problems with convection boundary conditions.*

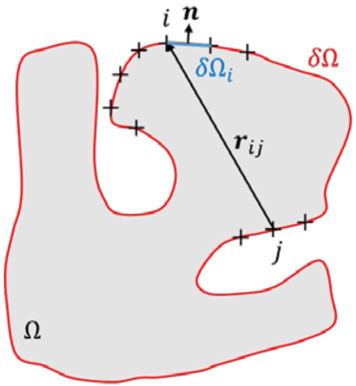
Changement de variable

Problème thermique modifié

$$\lambda^* \nabla\theta = \lambda(T)\nabla T \qquad \nabla^2\theta = 0$$

Problème de Laplace

PERTES THERMIQUES À TRAVERS LES RÉFRACTAIRES



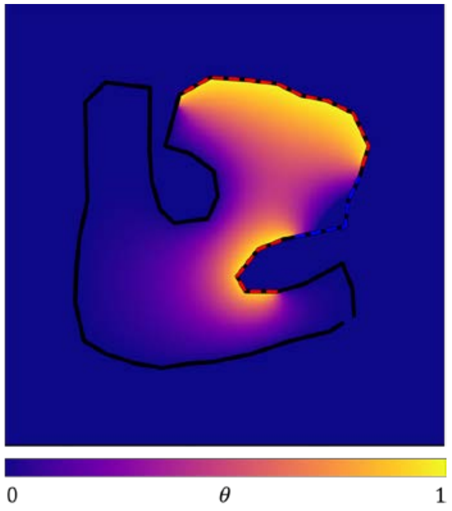
$\phi \in C^2$ θ : Champ de temperature (Kirchhoff)

$$\int_{\Omega} \theta \nabla^2 \phi \, dS = \int_{\delta\Omega} (\phi \boldsymbol{\nabla}\theta - \theta \boldsymbol{\nabla}\phi) \cdot \boldsymbol{n} \, dS$$ *Green-Ostrogradski*

Fonction de Green : $\nabla^2 G_{x_0} = \delta_{x_0}$

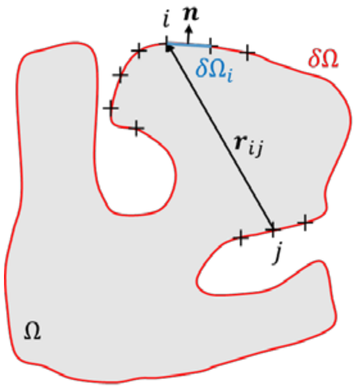
Cas 2D diffusif $\mathrm{G}_{\mathrm{x}_0}(x) = -\frac{1}{2\pi} \log(|x - x_0|)$

$$\boxed{\theta(x_0) = \int_{\delta\Omega} (\mathrm{G}_{\mathrm{x}_0} \boldsymbol{\nabla}\theta - \theta \boldsymbol{\nabla}\mathrm{G}_{\mathrm{x}_0}) \cdot \boldsymbol{n} \, dS}$$



PERTES THERMIQUES À TRAVERS LES RÉFRACTAIRES

Approche : Utilisation de la Boundary Element Method (BEM) pour calculer le problème thermique



Avantage de la méthode :

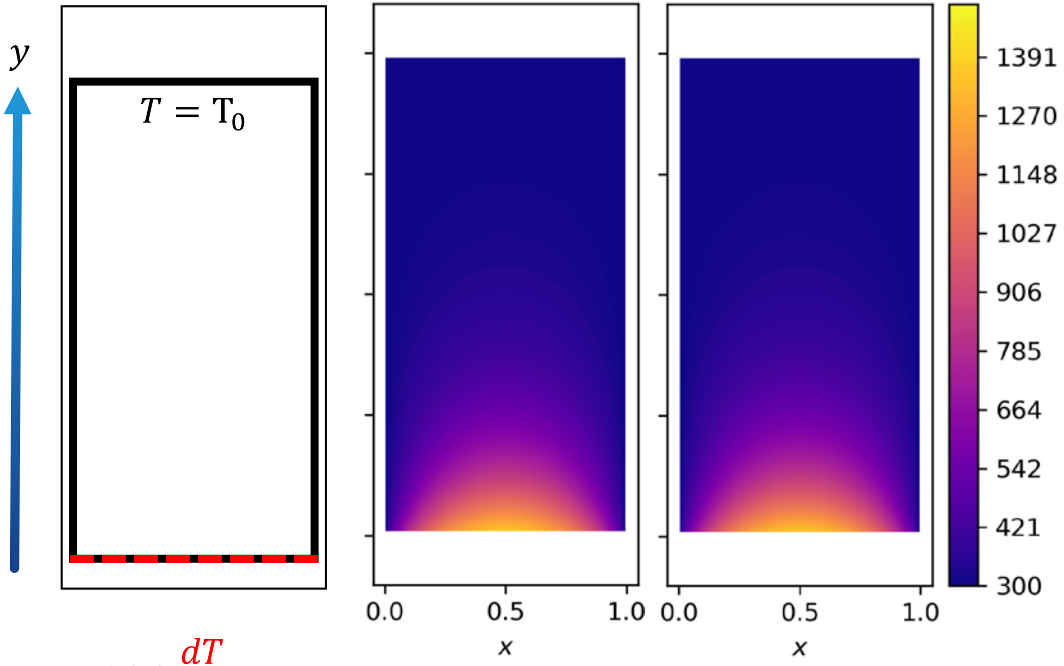
- *Plus rapide et nécessite moins de mémoire* : réduction de dimension (2D vers 1D)
- *Plus précise que les méthodes traditionnelles pour l'évaluation de quantités physiques aux frontières*

Inconvénients

- Ne peut être efficace que pour un nombre de problèmes physiques réduits (pour l'instant…)
- Difficulté de mise en œuvre par rapport aux méthodes traditionnelles (calculs + code)

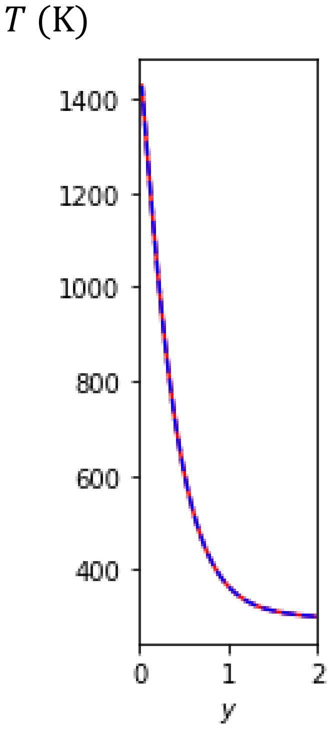
VALIDATION - ANALYTICS

Boundary **E**lement **M**ethod for the **E**valuation of **T**hermal **E**xchanges in **R**efractories



$$-\lambda(T)\frac{dT}{dy} = \phi_1$$

BEMETER THEORY



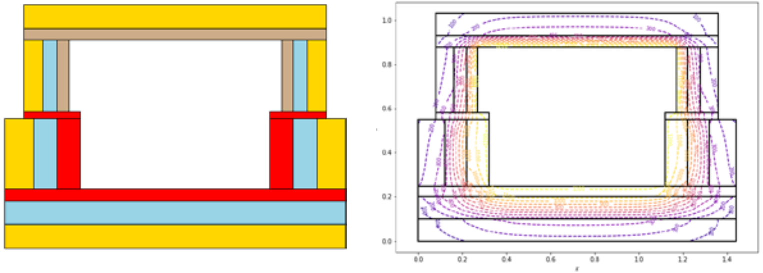
BEMETER

Theory

Was done also for Dirichlet, Robin and radiative boundary conditions

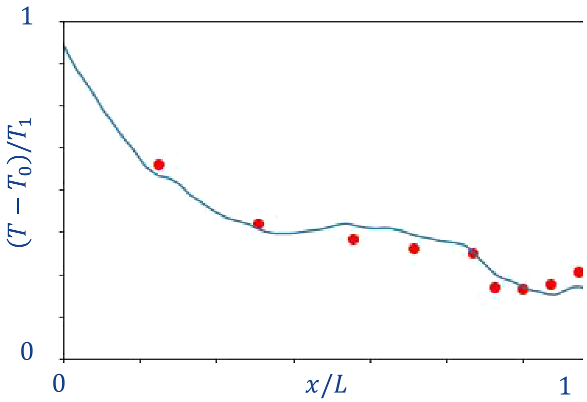
MODÈLE PHYSIQUE MINIMAL *REAL TIME CONTROL*

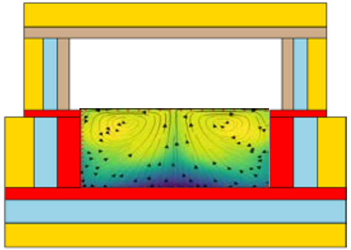
Calcul des pertes thermiques



Boundary **E**lement **M**ethod for the **E**valuation of **T**hermal **E**xchanges in **R**efractories

Profil de temperature le long du feeder

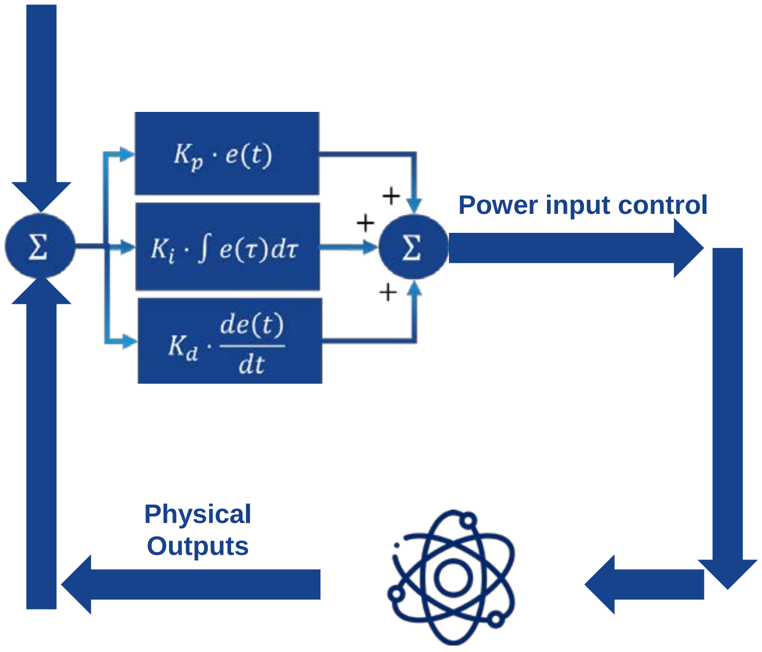




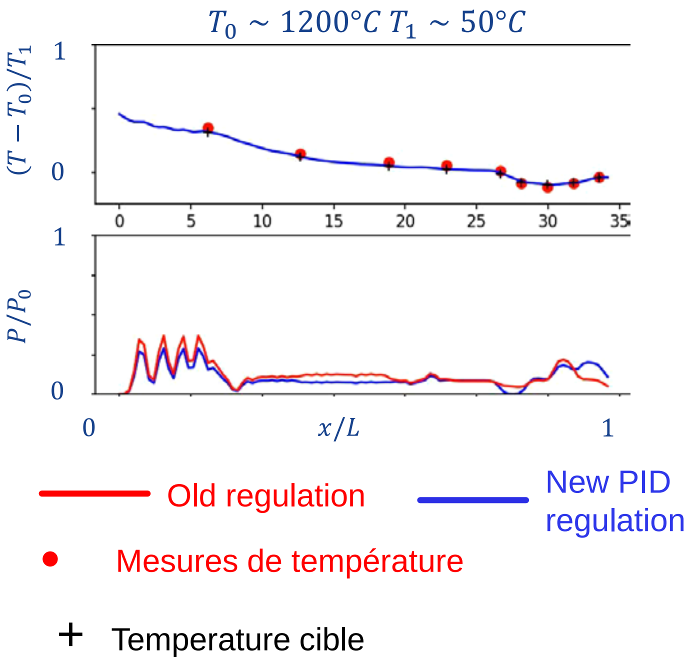
Modélisation simplifiée des écoulements

MODÈLE PHYSIQUE MINIMAL *REAL TIME CONTROL*

Cible : température stable pour le procédé de fibrage



Modèle physique



Le *modèle physique minimal* permet de prédire raisonnablement la thermique, ce qui permet d'estimer des coefficients PID adaptés

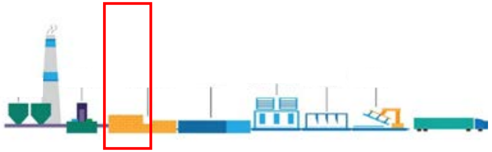
MODÈLES PHYSIQUES MINIMAUX

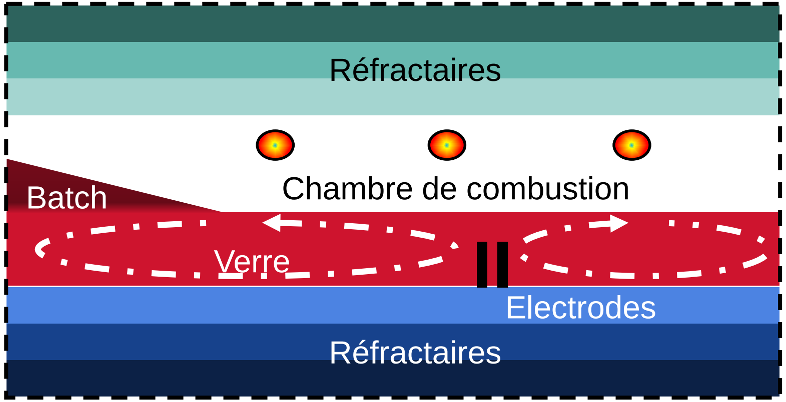
Défis pour l'élaboration du verre à Saint-Gobain : optimisation des procédés, recherche de design optimal, contrôle optimal

Modèle physique minimal pour le contrôle en temps réel des procédés

Modèle physique minimal pour la recherche de design optimal

ELABORATION DU VERRE PLAT (VITRAGE)





MODÈLE PHYSIQUE MINIMAL *FOR FAST DESIGN EXPLORATION*

TRANSVERSAL R&D CENTERS BY SAINT-GOBAIN

Schéma de principe d'un four de fusion à flamme

Données froides
réfractaires, géométrie, position et propriétés des électrodes / bruleurs
…

Point de fonctionnement
Débit de gaz, puissance électrique, tirée

→ **Modèle physique** →

Outputs industriels
Durée de vie du four, consomation d'énergie, qualité, emissions, coût

Minimisation d'une fonction de coût :

$$\Phi = f(\text{qualité}, \text{énergie}, \text{usure}, \text{coût})$$

MODÈLE PHYSIQUE MINIMAL *FOR FAST DESIGN EXPLORATION*

TRANSVERSAL R&D CENTERS BY SAINT-GOBAIN

Schéma de principe d'un four de fusion à flamme

Données froides
réfractaires, géométrie, position et propriétés des électrodes / bruleurs
…

Point de fonctionnement
Débit de gaz, puissance électrique, tirée

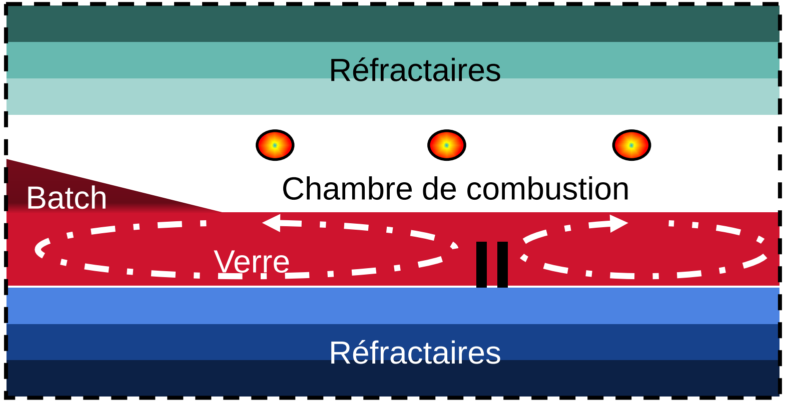
Modèle physique

Outputs industriels
Durée de vie du four, consomation d'énergie, qualité, emissions, coût

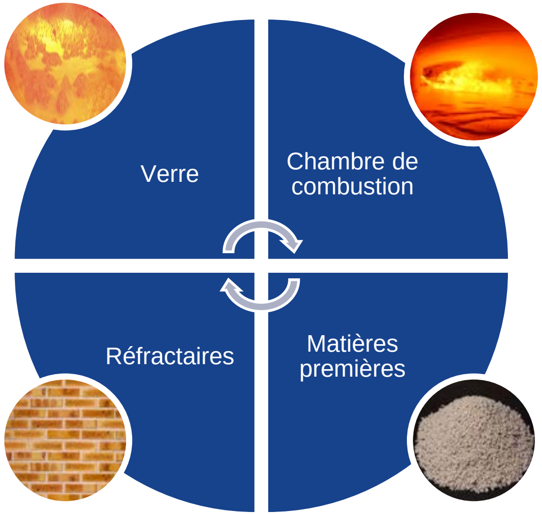
Quelle approche de modélisation physique choisir ?

- Simulation numérique complète (CFD) ?
- Approche Data sciences basée sur de la donnée capteur
- Approche physique minimale

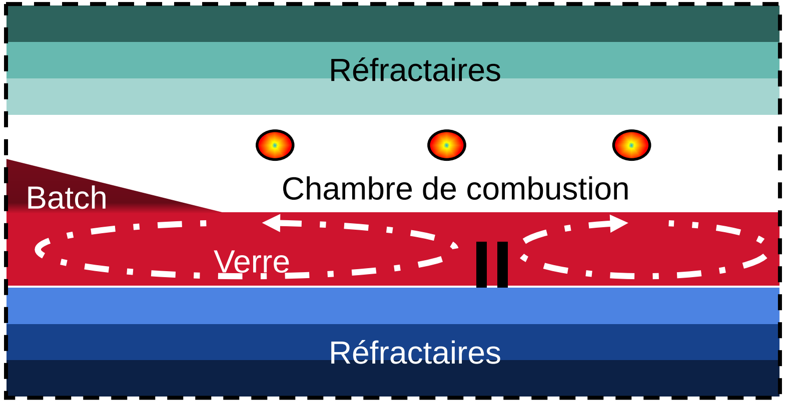
MODÈLE PHYSIQUE MINIMAL *FOR FAST DESIGN EXPLORATION*



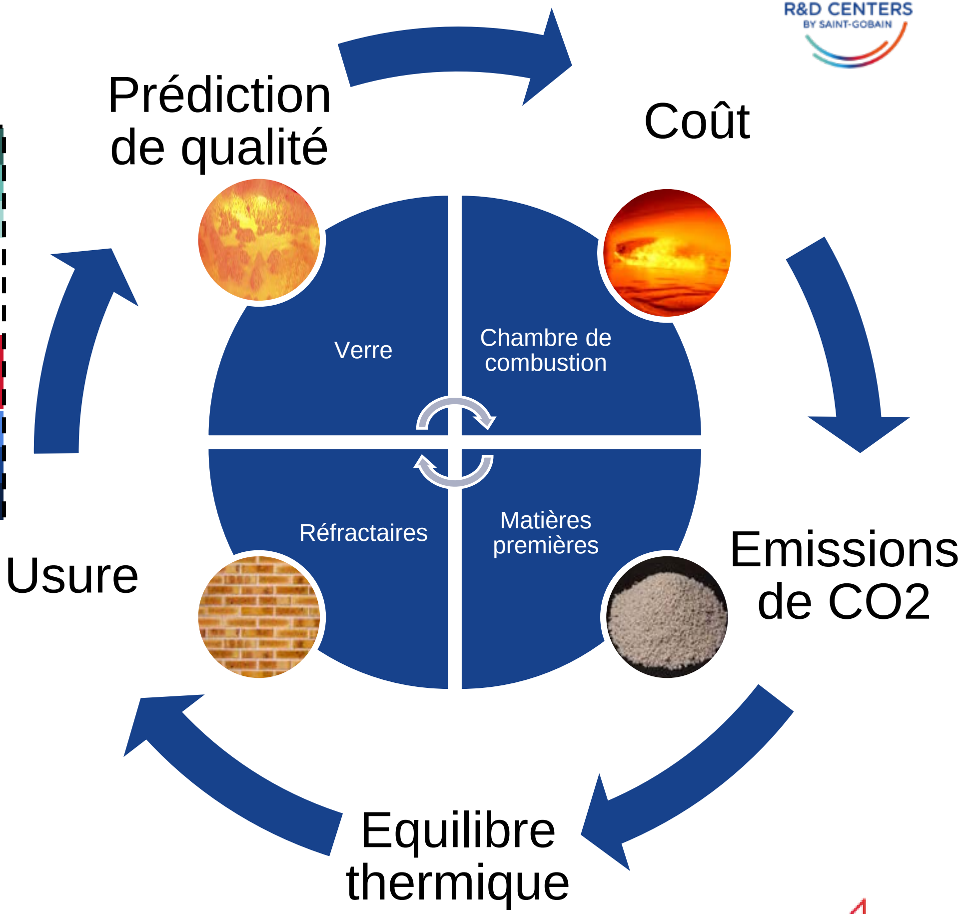
Description physique minimale par bloc, l’ensemble des blocs étant couplés par des équations de conservation de **l’énergie** et de la **masse**.



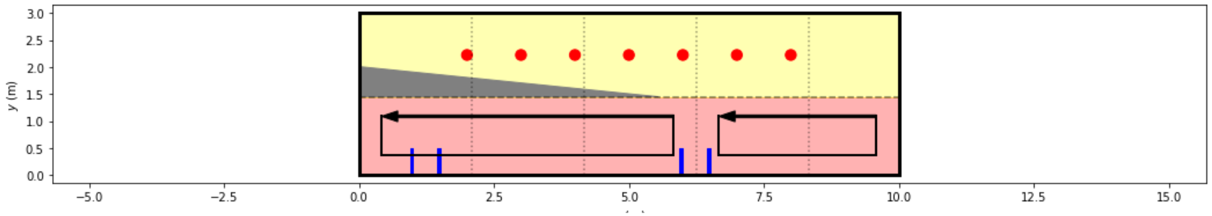
MODÈLE PHYSIQUE MINIMAL *FOR FAST DESIGN EXPLORATION*

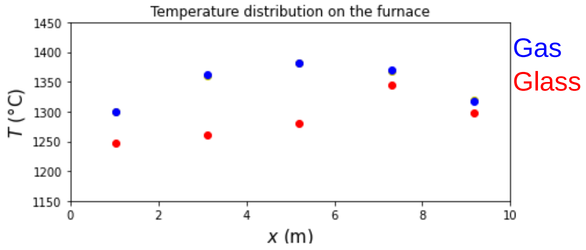


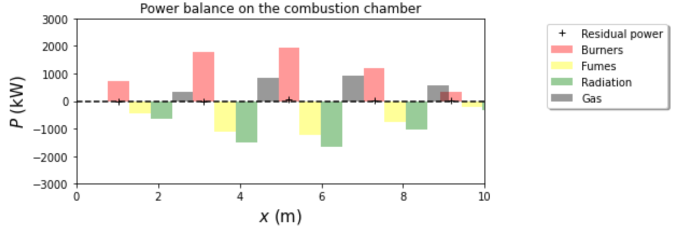
Description physique minimale par bloc, l'ensemble des blocs étant couplés par des équations de conservation de **l'énergie** et de la **masse**.

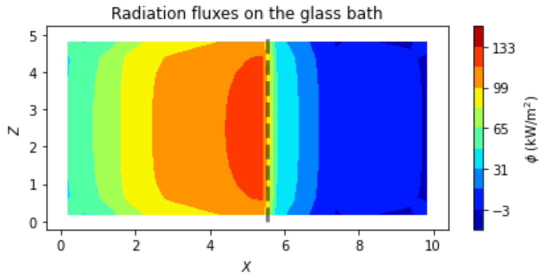


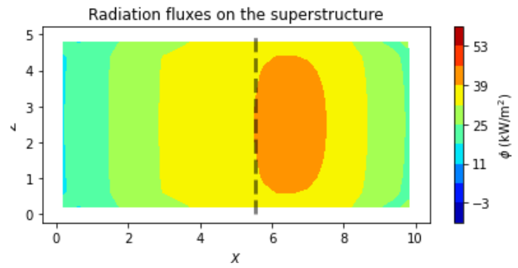
MODÈLE PHYSIQUE MINIMAL : REDUCED ENERGY DYNAMICS



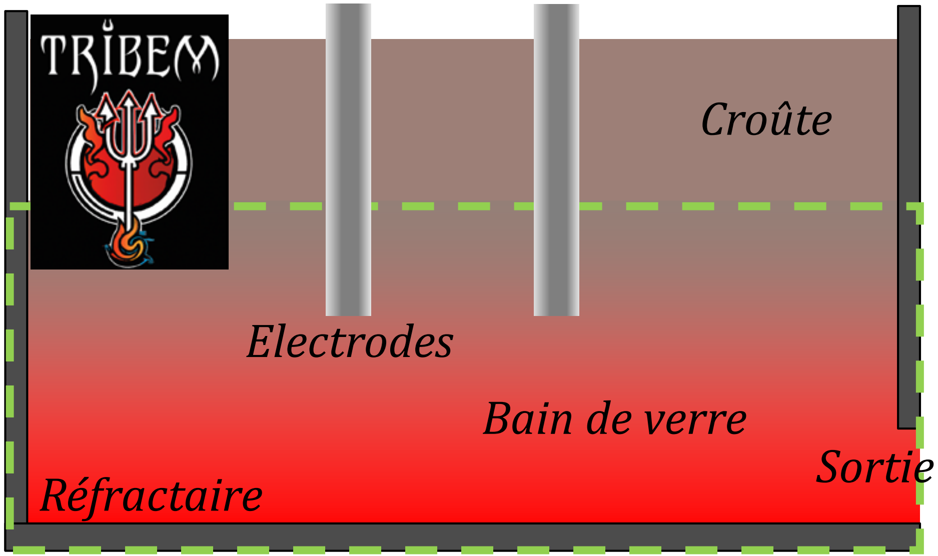








DERNIER PETIT EXEMPLE : FOUR ELECTRIQUE



Tri-BEM : domaine d'étude

- Approximation 2D ou 2.5D
- Utilisant l'approche *boundary element method*

Module electrique

Module écoulement

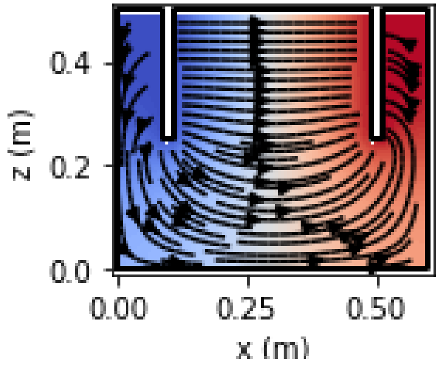
Module réfractaire

Module thermique

CHAMP ELECTRIQUE

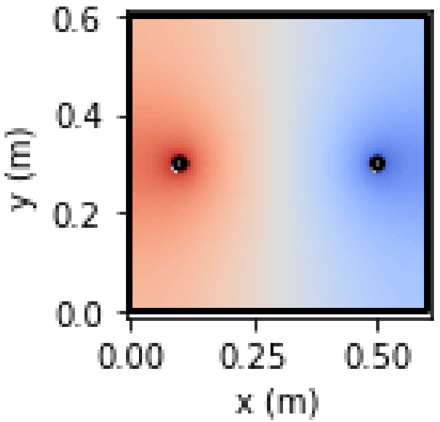
Inputs:
- Puissance électrique
- Géométrie
- Type de verre et tirée cible

Outputs:
- Champ électrique dans le four
- Distribution des sources thermiques



Méthode & approximations :

- Equation de Laplace $\nabla^2\psi = 0$
- Pas de dépendance locale à la temperature (champ moyen)
- Approximation 2.5D
- Méthode B.E.M



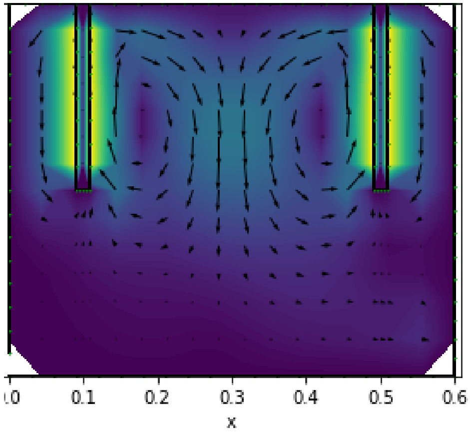
ECOULEMENT

Inputs:
- Puissance électrique
- Géométrie
- Type de verre et tirée cible

Outputs:
- Distribution du champ de vitesse

Méthode & approximations :

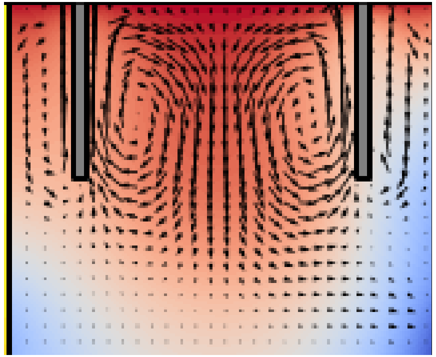
- Ecoulement de Stokes et convection naturelle “imagée”
- Pas de dépendance locale de la viscosité avec la température (champ moyen)
- Méthode B.E.M



CHAMP DE TEMPERATURE

Inputs:
- Recette du verre
- Temperature en dessous de la croûte

Outputs:
- Champ de température



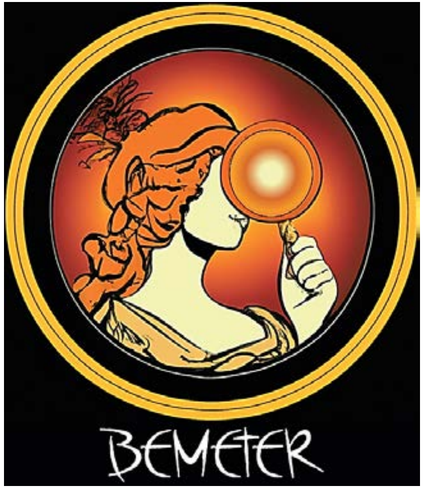
Méthode & approximations :

- Diffusion-advection avec sources thermiques
- Pas de dépendance locale de la conductivité thermique avec la temperature
- Méthode aux differences finies

PERTES THERMIQUE AUX NIVEAUX DES REFRACTAIRES

Inputs:
- Empilement réfractaire
- Température extérieure

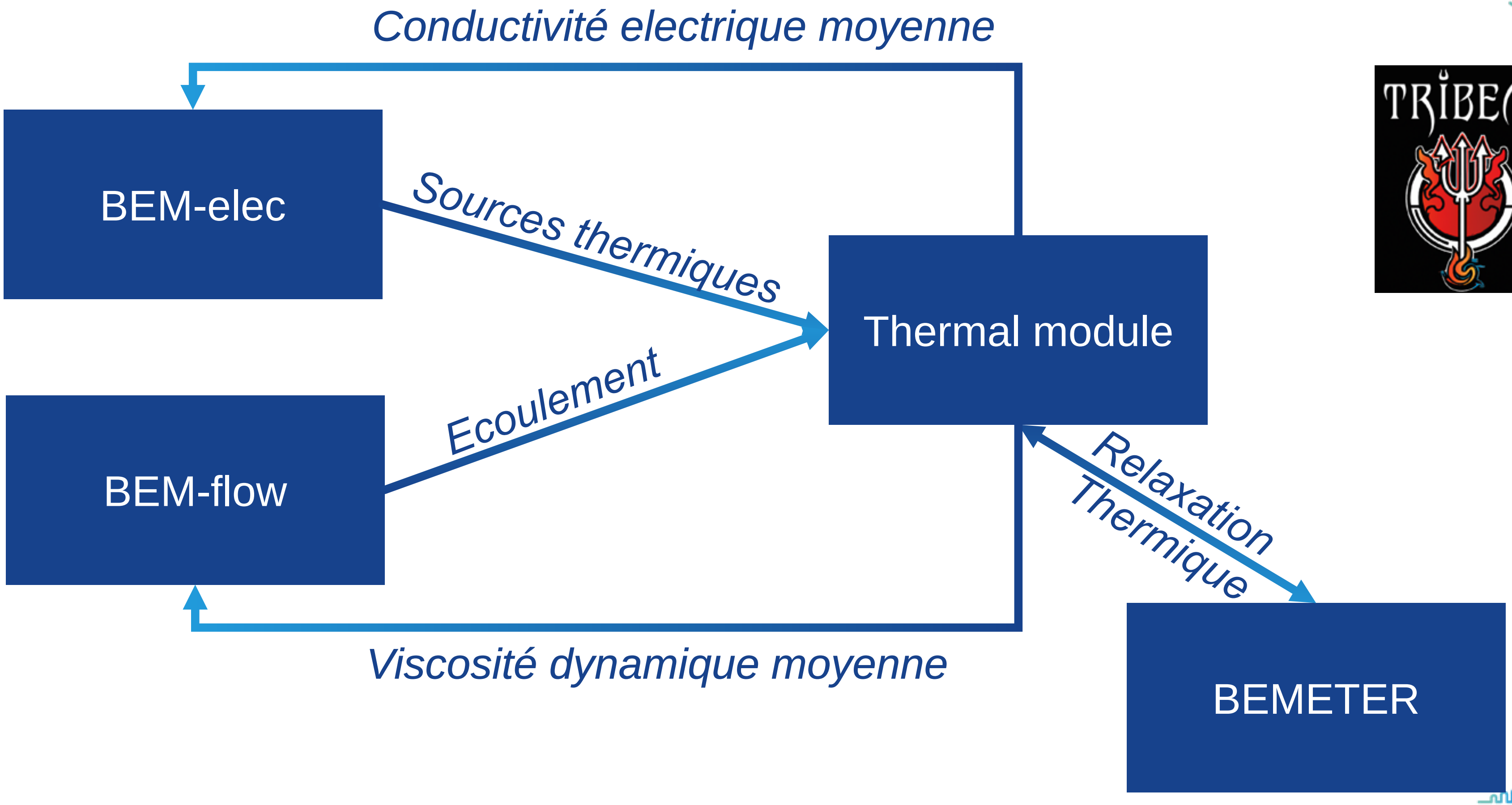
Outputs:
- Flux thermiques



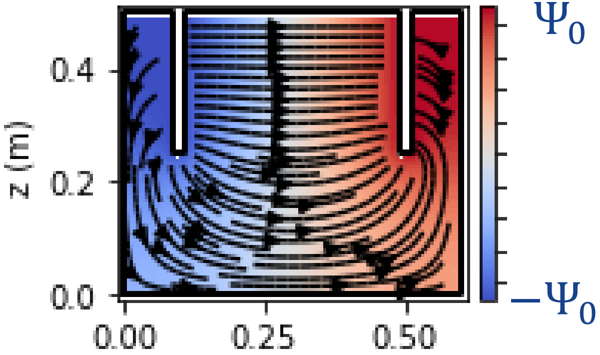
Méthode & approximations:

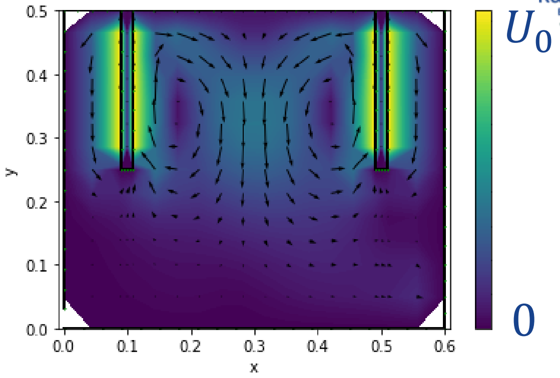
- Méthode B.E.M

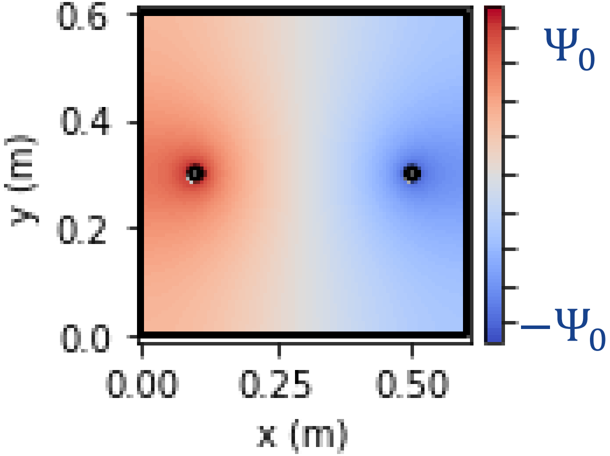
MODÈLE PHYSIQUE MINIMAL

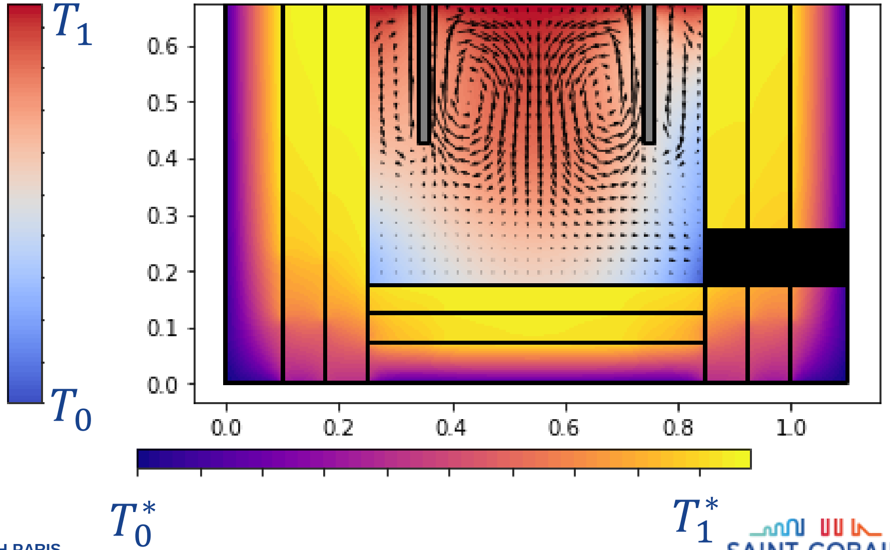


ELECTRODES LONGUES

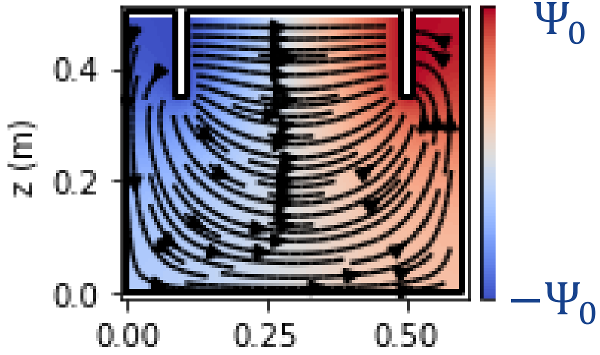


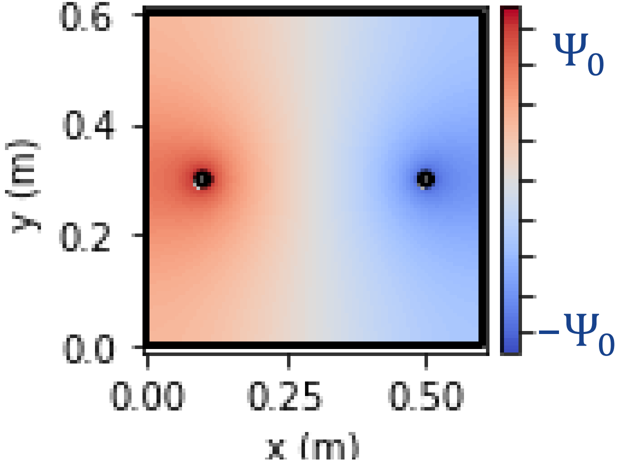


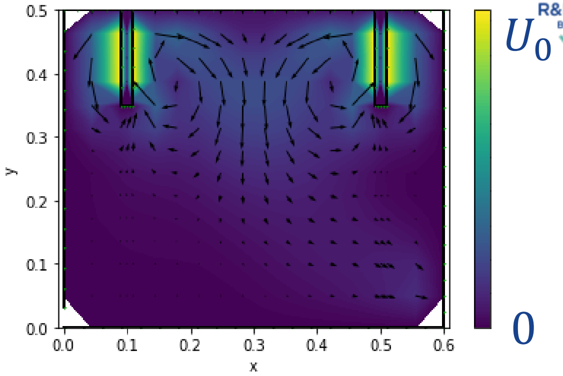


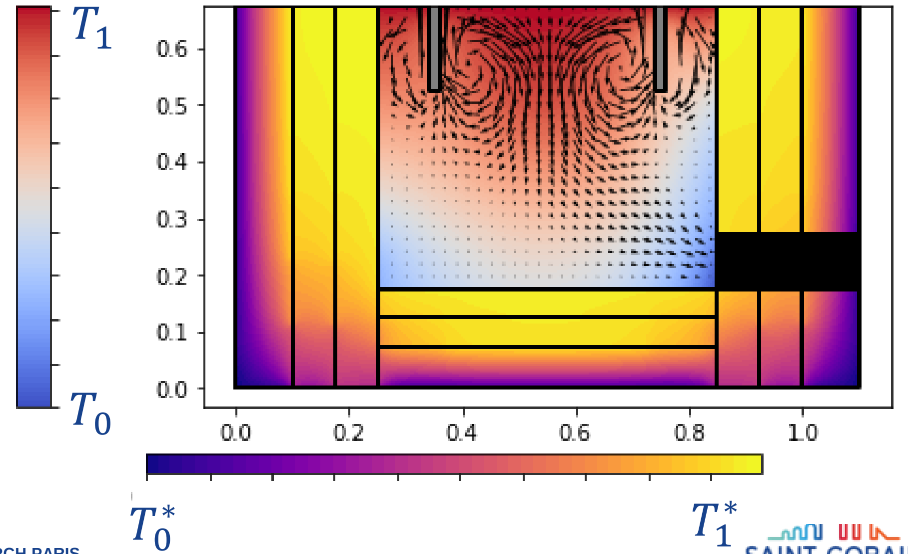


ELECTRODES COURTES









CONCLUSION & PERSPECTIVES

Les modèles physiques minimaux sont en cours de développement à Saint-Gobain recherche en parallèle de simulations numériques complètes, pour fournir aux équipes de design et aux usines de nouveaux outils physiques pour la production

MERCI !

QUESTIONS ?

Saint-Gobain Confidential & Proprietary