



Détermination par méthode inverse des conditions limites et des propriétés thermophysiques d'un matériau inerte soumis au cône calorimètre.

Hassan FLITY^{1,2}, Zoubir ACEM¹, Paul LARDET² et Gilles PARENT¹

¹ LEMTA (UMR CNRS 7563), Université de Lorraine, Nancy, France

² CSTB, Université Paris-Est, France

Contexte général: Dégradation et combustion du bois de construction.

Bois de construction

- Tenue mécanique.
- Facilité de mise en oeuvre.
- Substitution:
 - Acier: 20 GJ/tonne.
 - Béton: 5 GJ/tonne.



- Comportement au feu.
- Règles strictes.

Objectifs

- Modèle détaillé à l'échelle du cône.
- Modèle simplifié à destination de l'ingénierie de la sécurité incendie.

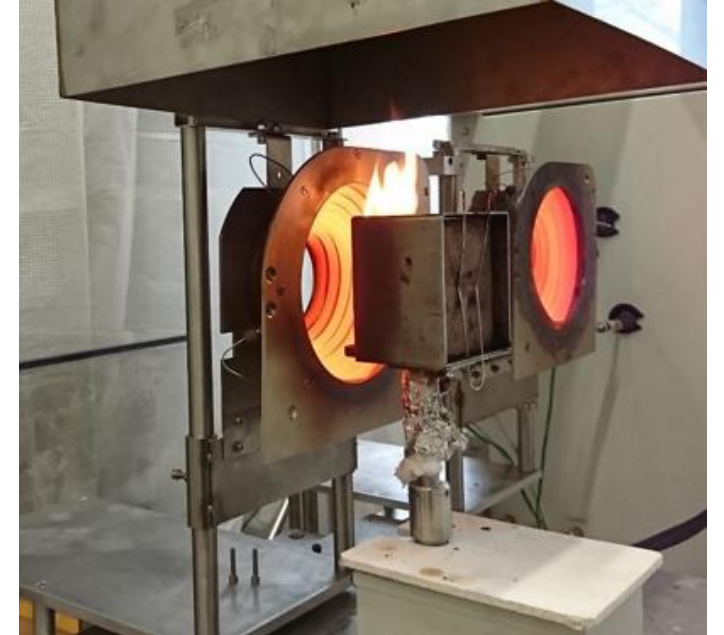
Modèle multiphysique

- Transfert de chaleur et de masse.
- Modèle cinétique.
- Flamme.

Matériau inerte

- Modèle thermique pur.
- 1D ou 3D ?
- Flux homogène ?
- Estimation des coefficients de convection.

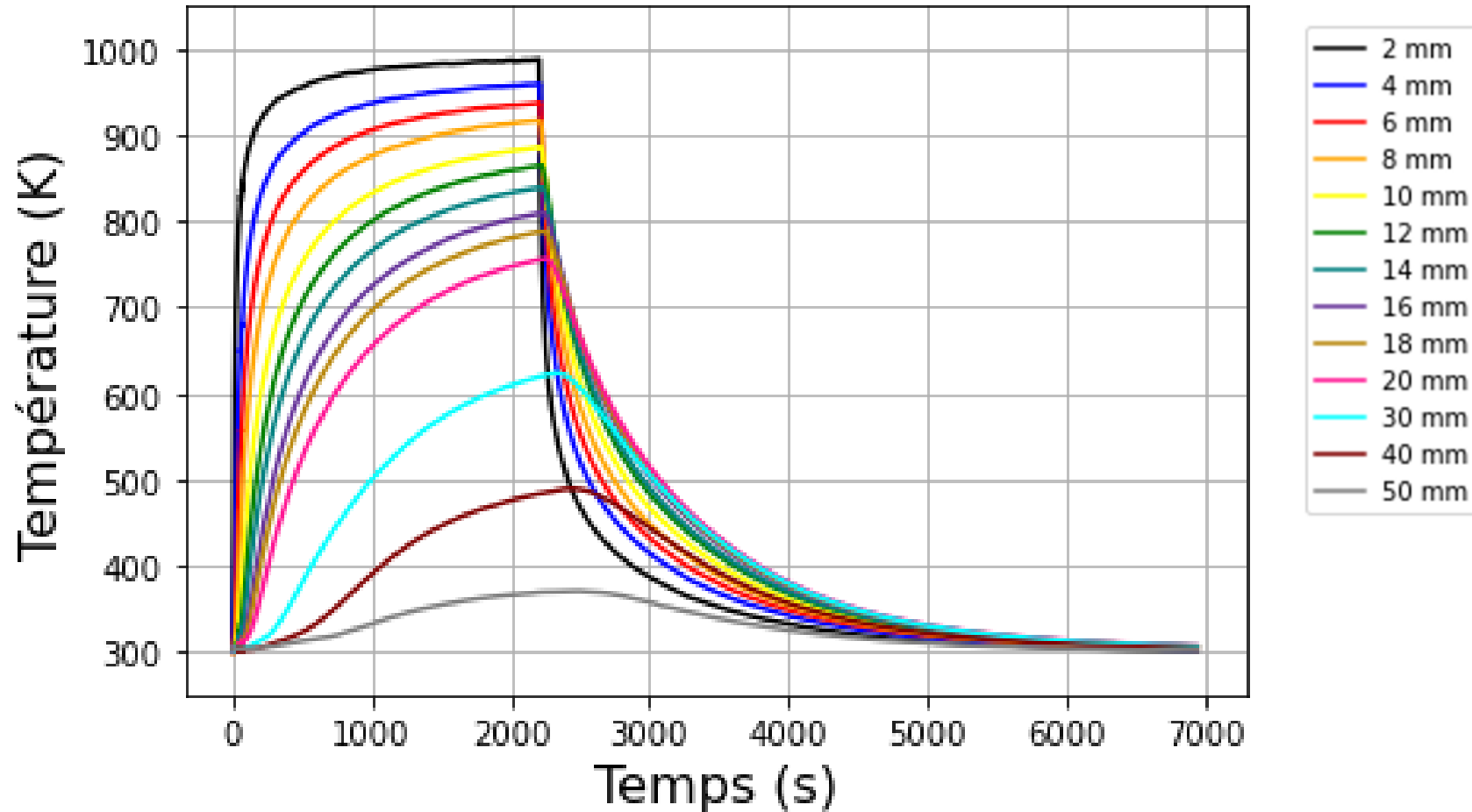
Matériel et Méthode.



- Silicate de calcium.
- Conductivité thermique: [0.08;0.2] W/m/K.
- Chaleur spécifique: 1000 J/Kg/K.
- Méthode du fil chaud avec 10% d'incertitude.
- Épaisseur = 5 cm.
- Thermocouples noyés: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30, 40 et 50 mm [1].

- Porte échantillon: 2 cm.
- Flux = {25, 35, 45, 55, 65, 75} KW/ m².
- Exposition au cône pendant 30 min environ.
- Enregistrement des T° pendant le chauffage et le refroidissement.

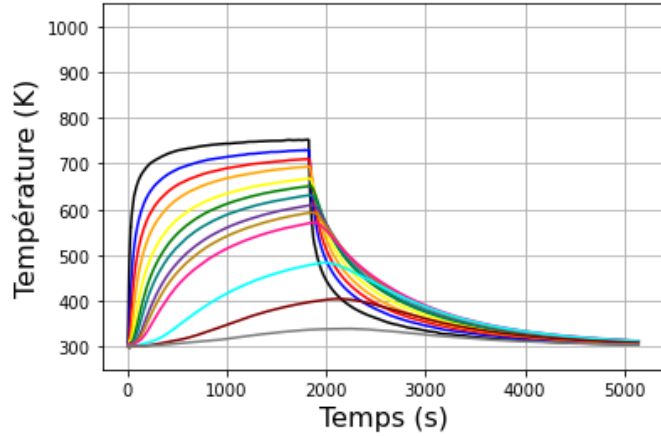
Thermogrammes obtenus:



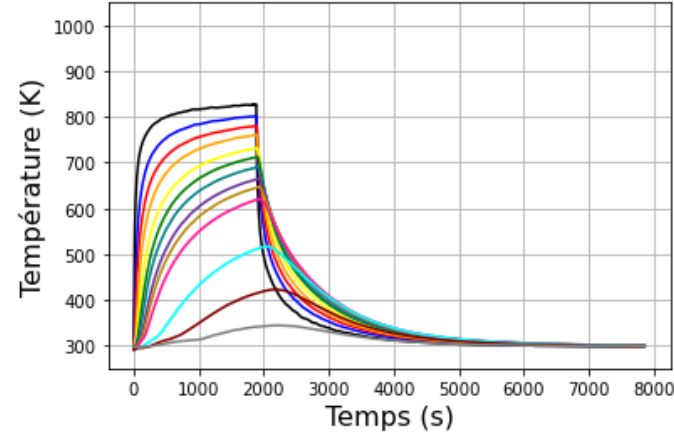
Flux = 65 KW/m²

Thermogrammes obtenus:

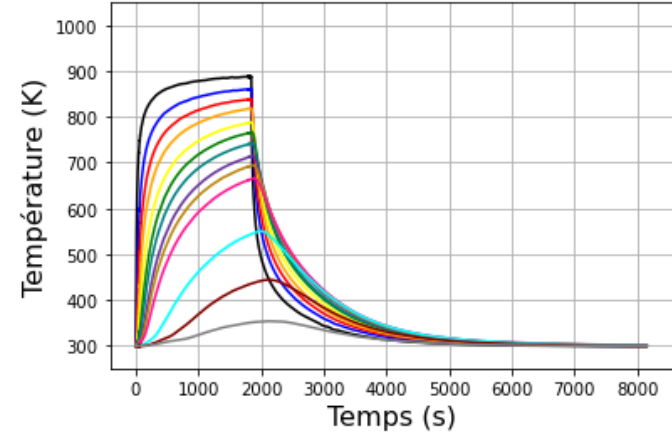
Flux = 25 KW/m²



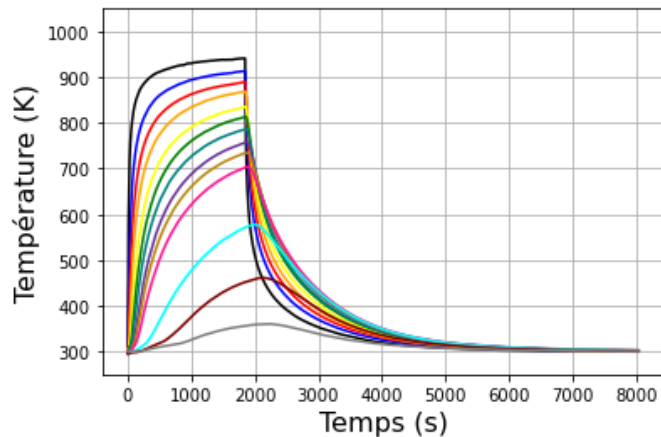
Flux = 35 KW/m²



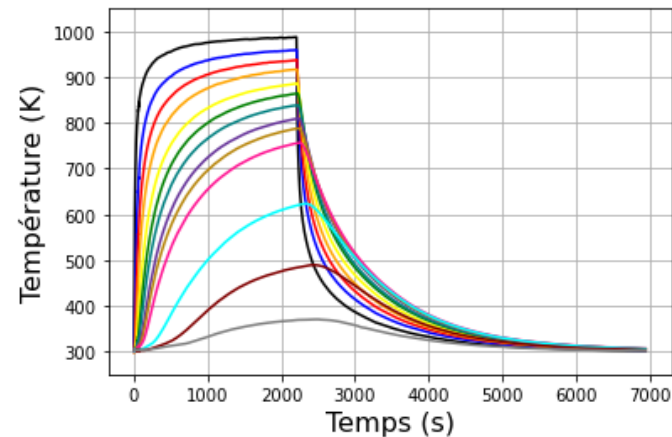
Flux = 45 KW/m²



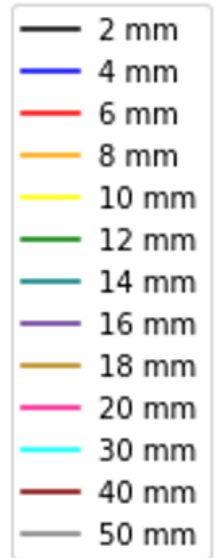
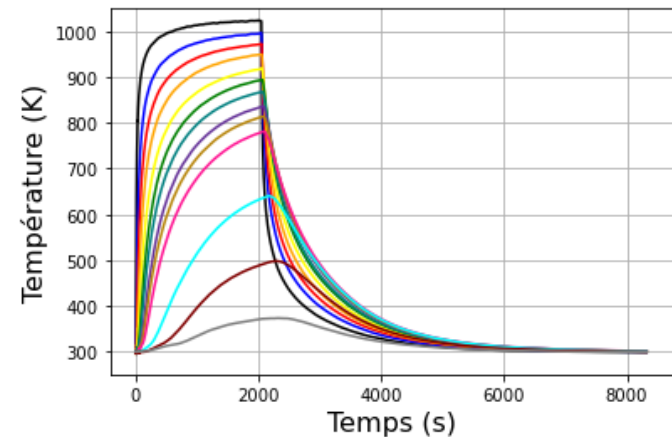
Flux = 55 KW/m²



Flux = 65 KW/m²

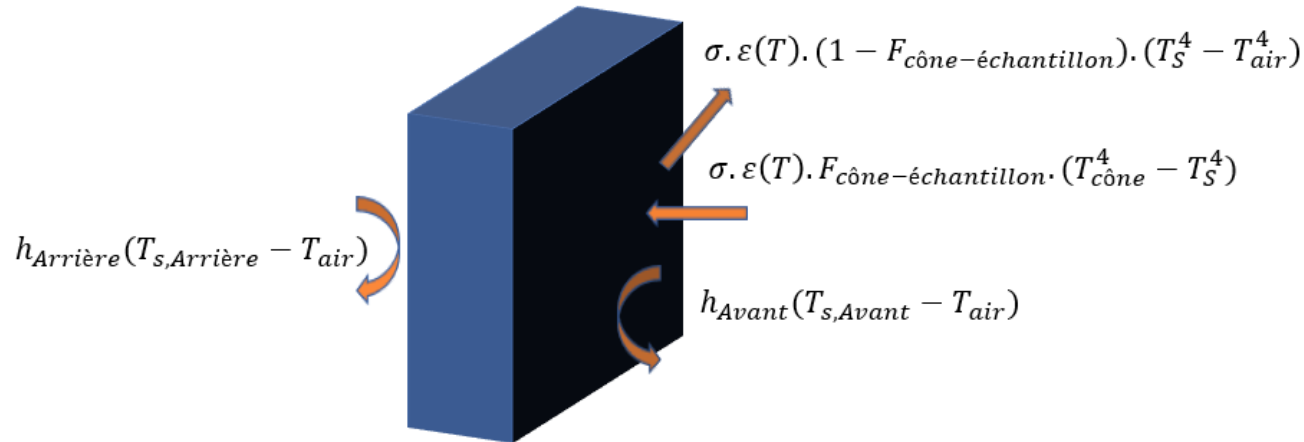


Flux = 75 KW/m²



Inversion sur un modèle 1D:

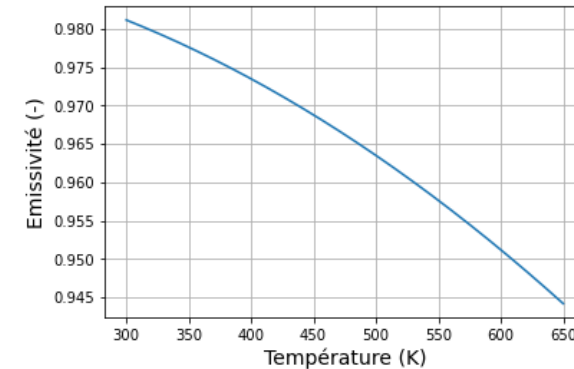
Conditions aux bords:



Modèle:

- Méthode des volumes finis.
- Schéma explicite.
- Conductivité: polynôme de degré 2.
- Chaleur spécifique: linéaire logarithmique.
- $F = 0.76$ (MC).
- Résolution sous Python.

Émissivité du silicate mesuré par spectrométrie infrarouge:



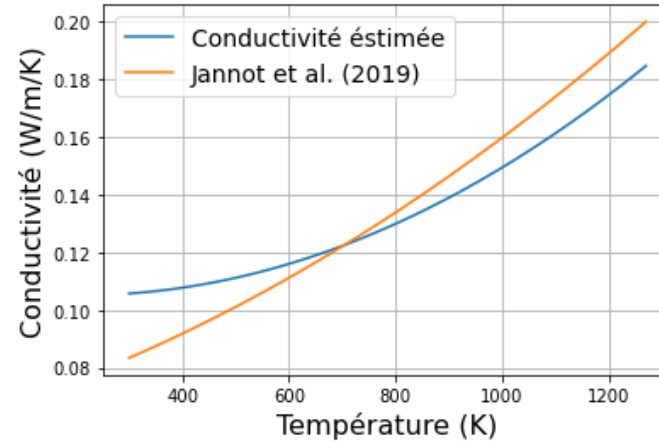
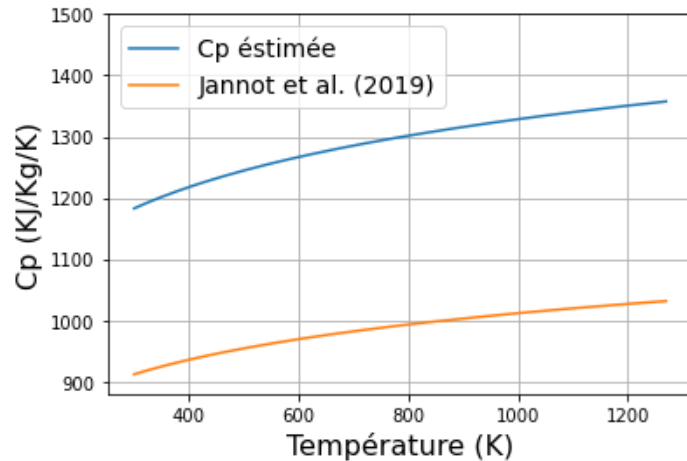
$$\varepsilon(T) = -1,157 \cdot 10^{-8} T^2 + 4,26 \cdot 10^{-6} T + 0,99$$

Méthode inverse:

- Méthode des moindres carrés.
- Minimisation par l'algorithme de Levenberg-Marquardt.
- **Inversion sur tous les flux en même temps (12 thermogrammes X 6 flux).**
- Inconnues = {conductivité, C_p , $h_{\text{face avant chauffage}}$, $h_{\text{face avant refroidissement}}$, $h_{\text{face arrière}}$ }.

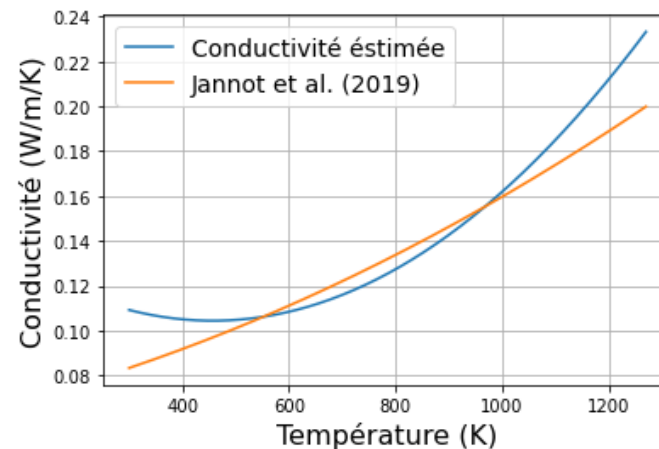
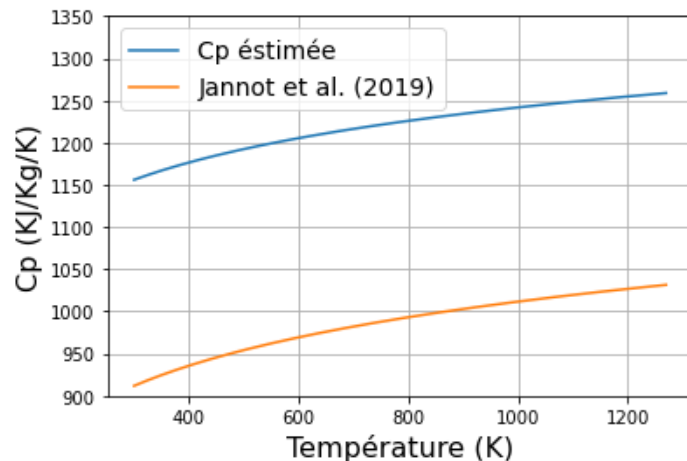
Résultats:

Un coefficient de convection pour tous les flux:



- $h_{\text{face avant chauffage}} = 10.93 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $h_{\text{face avant refroidissement}} = 14.25 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $h_{\text{face arrière}} = 22.25 \text{ W/m}^2 / \text{K}$

Un coefficient de convection pour chaque flux:

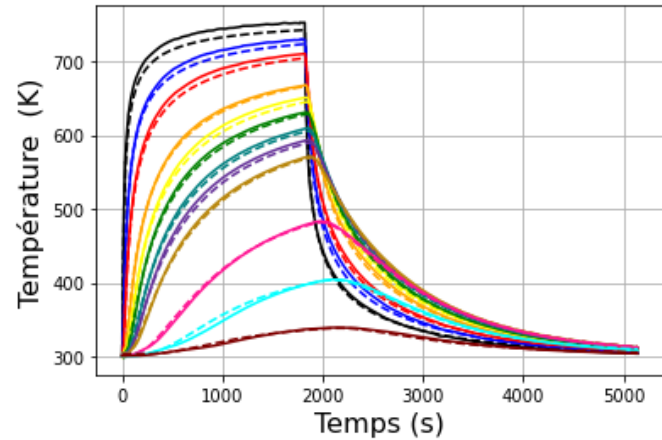


- $h_{\text{face avant refroidissement}} = 12.86 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $h_{\text{face arrière}} = 20.8 \text{ W/m}^2 / \text{K}$

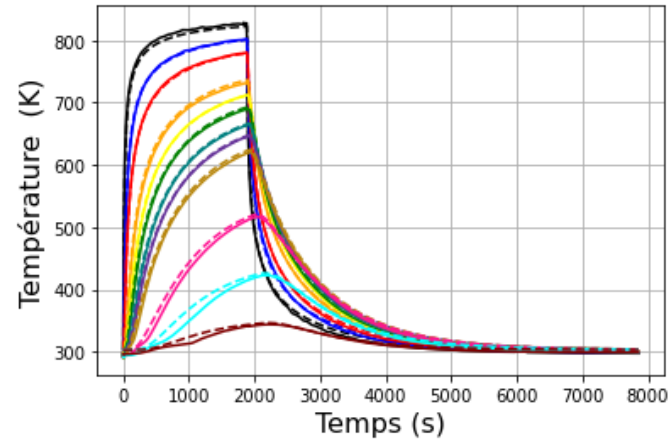
Flux (KW/m ²)	Coefficient de convection face avant (W/m ² /K)
25	8,88
35	12
45	11,53
55	13
65	14
75	16

Un coefficient de convection pour tous les flux; $F = 0.76$ (MC) :

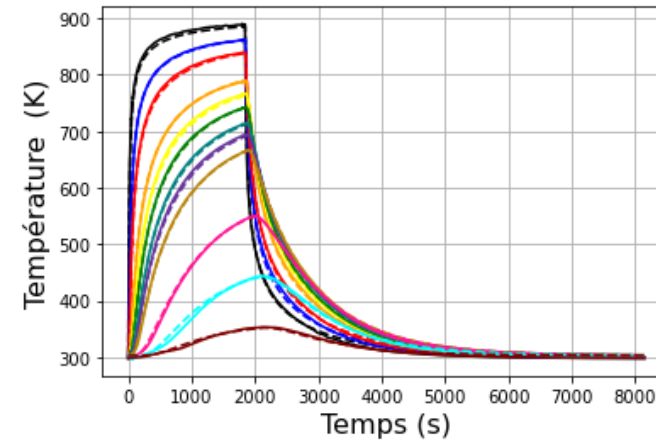
Flux = 25 KW/m²



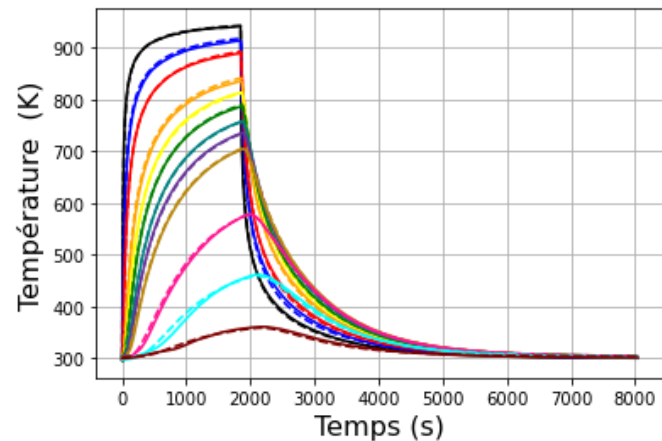
Flux = 35 KW/m²



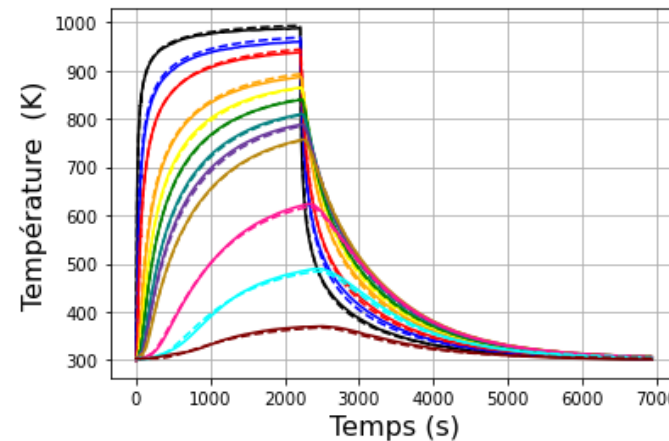
Flux = 45 KW/m²



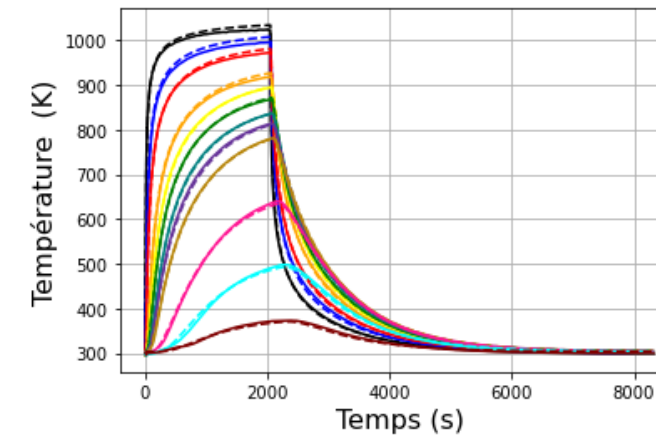
Flux = 55 KW/m²



Flux = 65 KW/m²



Flux = 75 KW/m²



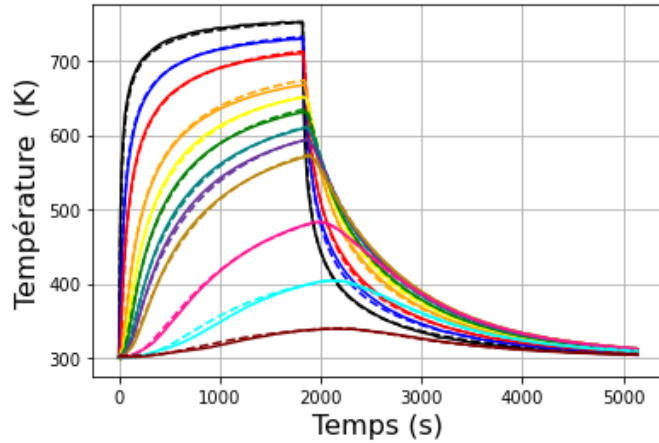
--- Résultats numériques
— Résultats expérimentaux

- 2 mm
- 4 mm
- 6 mm
- 8 mm
- 10 mm
- 12 mm
- 14 mm
- 16 mm
- 18 mm
- 20 mm
- 30 mm
- 40 mm

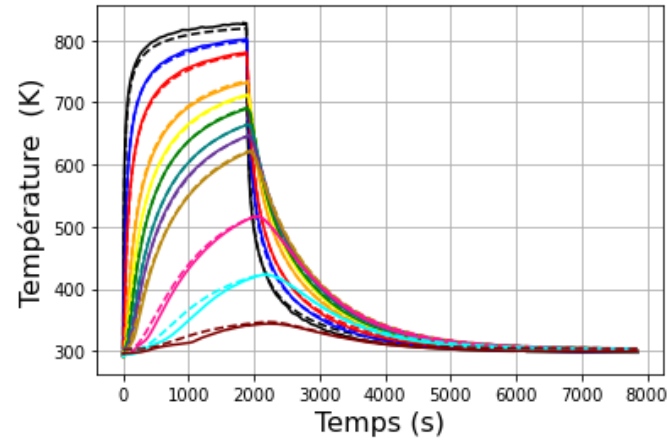
RMSE = 4.84

Un coefficient de convection pour chaque flux; $F = 0.76$ (MC) :

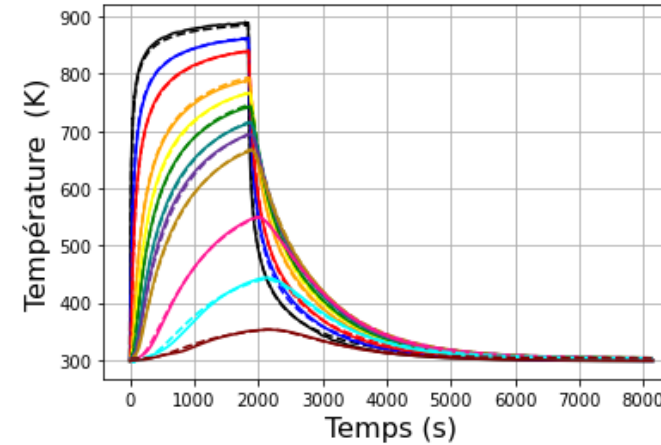
Flux = 25 KW/m²



Flux = 35 KW/m²

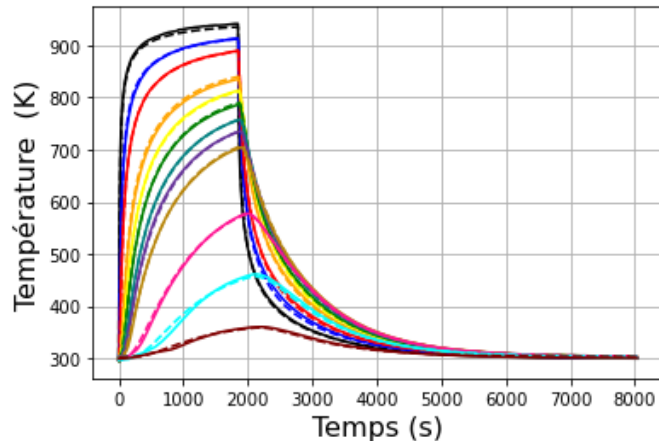


Flux = 45 KW/m²

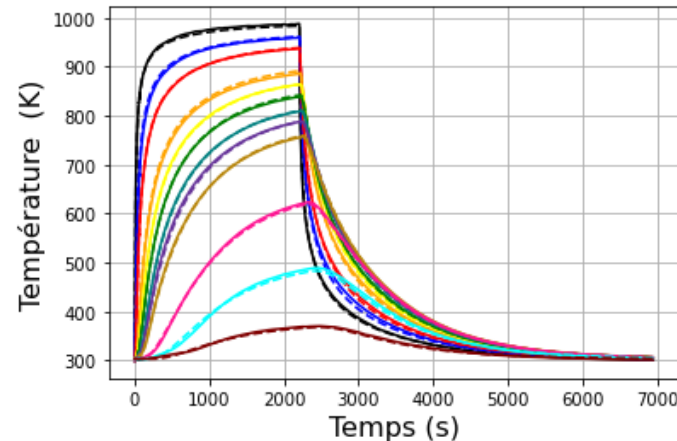


--- Résultats numériques
— Résultats expérimentaux

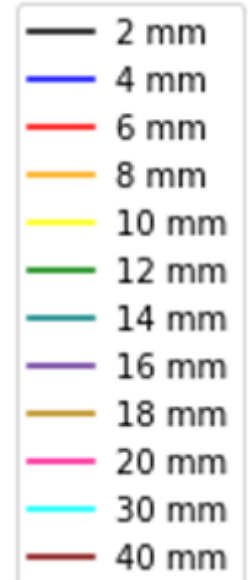
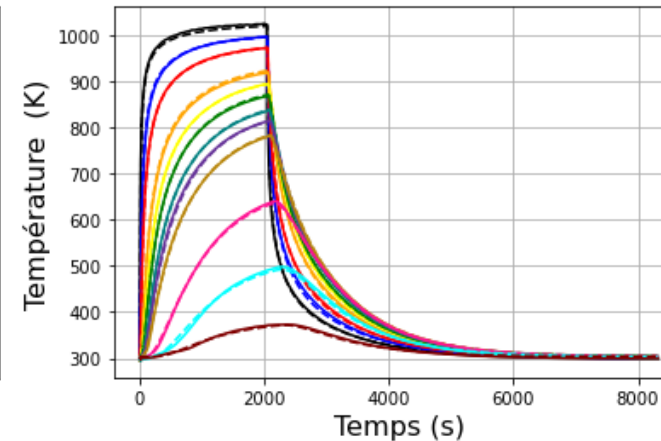
Flux = 55 KW/m²



Flux = 65 KW/m²



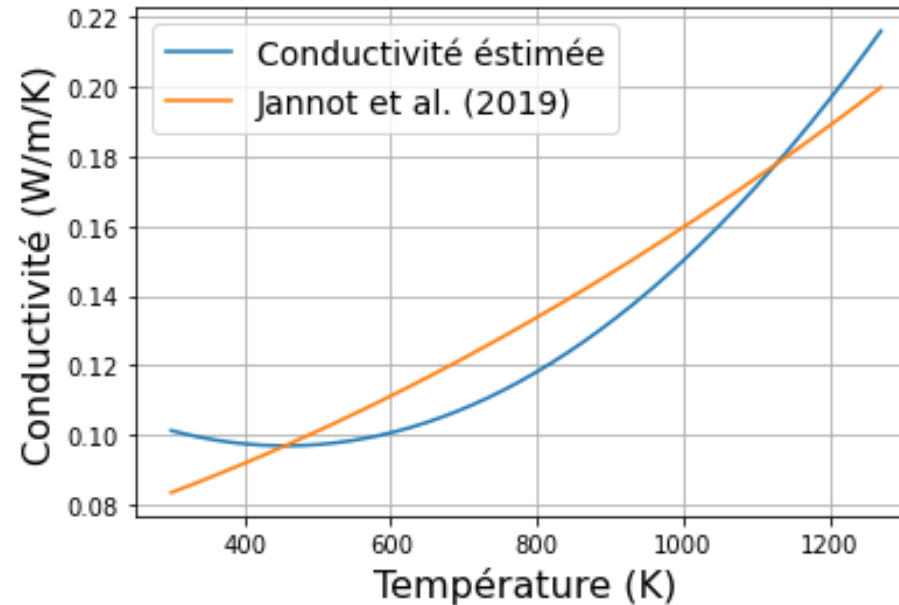
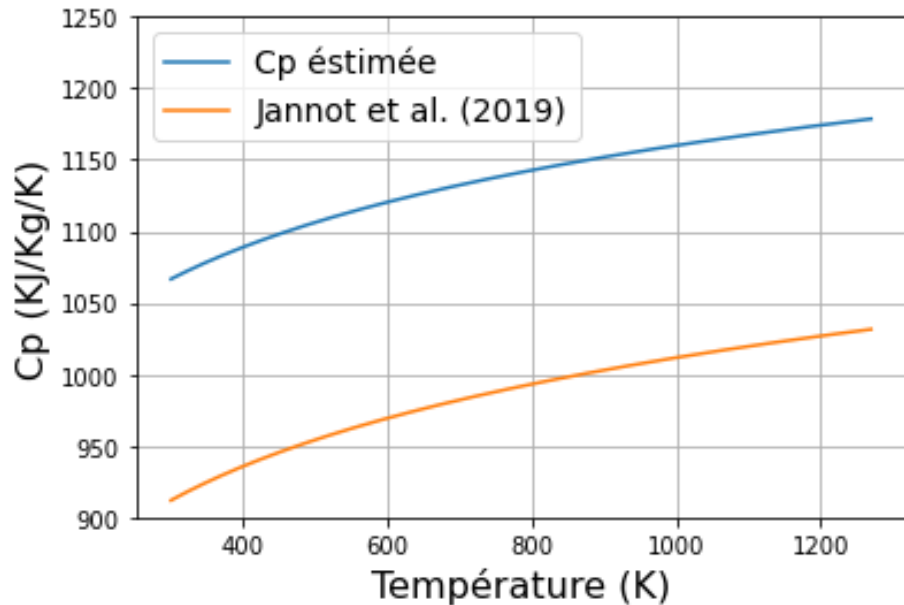
Flux = 75 KW/m²



RMSE = 3.995

Inversion avec un facteur de forme inconnu:

Un coefficient de convection pour tous les flux et F inconnu:

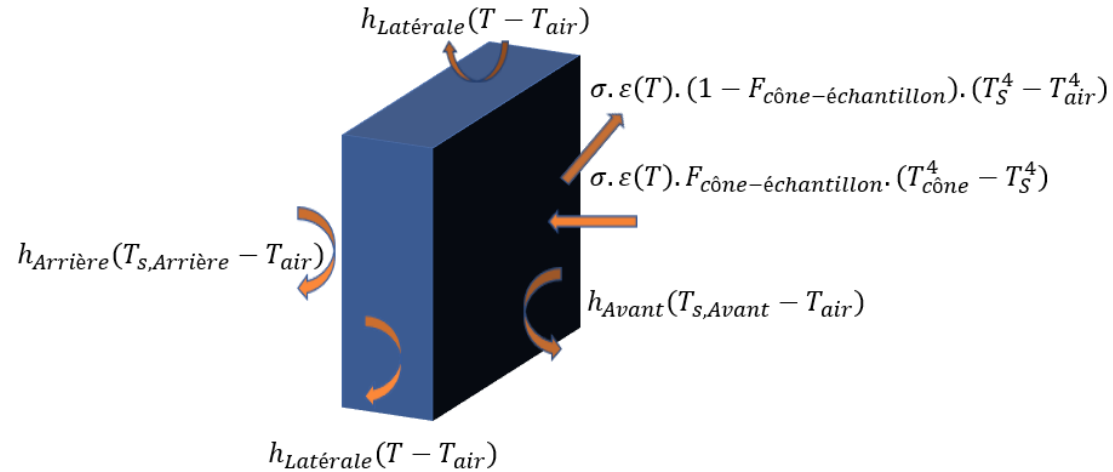


- $h_{\text{face avant chauffage}} = 1.92 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $h_{\text{face avant refroidissement}} = 11.31 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $h_{\text{face arrière}} = 19 \text{ W/m}^2 / \text{K}$

- $F = 0.646$
- $\text{RMSE} = 4.2$

Inversion sur un modèle 3D: Flux homogène

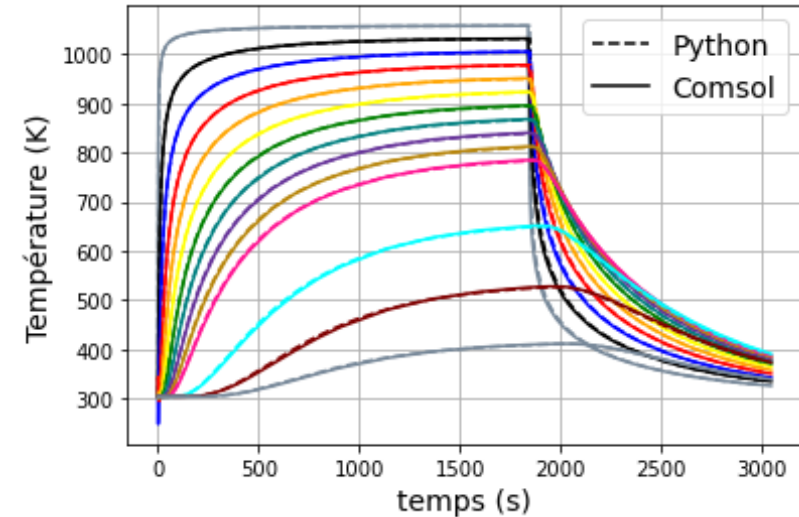
Conditions aux bords:



Modèle:

- Méthode des volumes finis.
- Schéma explicite.
- 2 plans de symétries
- Contact thermique idéal entre l'échantillon et le porte échantillon.
- Résolution sous Python.

Comparaison Python et COMSOL :

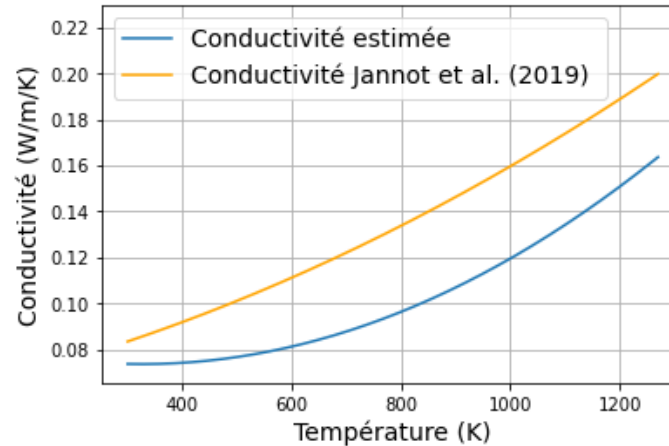
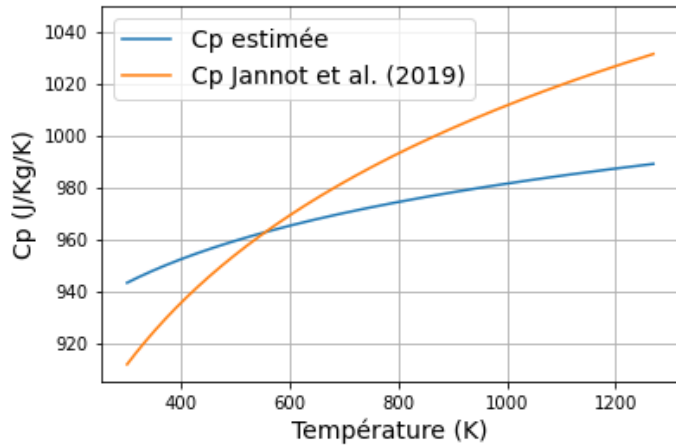


Méthode inverse:

- Méthode des moindres carrées.
- Minimisation par l'algorithme de Levenberg-Marquardt.
- **Inversion sur tous les flux en même temps.**
- Inconnus = {conductivité, C_p , F , $h_{\text{face avant chauffage}}$, $h_{\text{face avant refroidissement}}$, $h_{\text{face arrière}}$, $h_{\text{Latérale}}$ }.

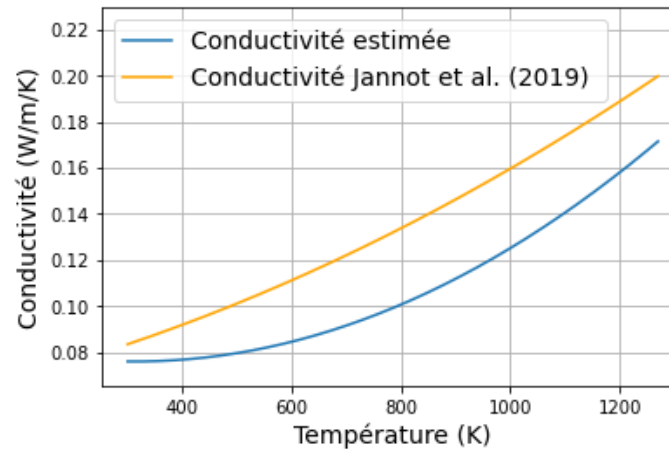
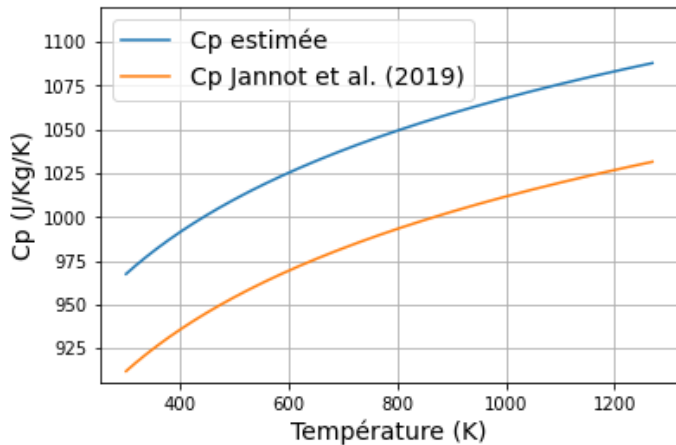
Résultats:

Échantillon 14 X 14 cm²:



- $h_{\text{face avant chauffage}} = 3.82 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $h_{\text{face avant refroidissement}} = 7.44 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $h_{\text{face arrière}} = 13.88 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $h_{\text{latérale}} = 7.2 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $F = 0.665$
- **RMSE = 3.99**

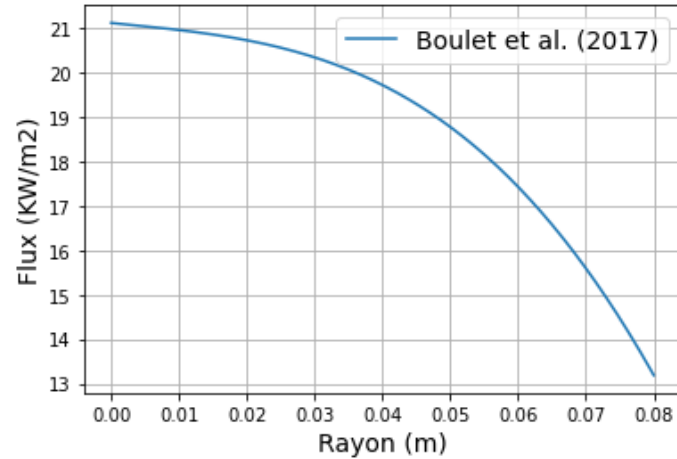
Échantillon 10 X 10 cm²:



- $h_{\text{face avant chauffage}} = 3.22 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $h_{\text{face avant refroidissement}} = 8.4 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $h_{\text{face arrière}} = 14.21 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $h_{\text{latérale}} = 1.5196 \text{ W/m}^2 / \text{K}$
- $F = 0.66$
- **RMSE = 4.05**

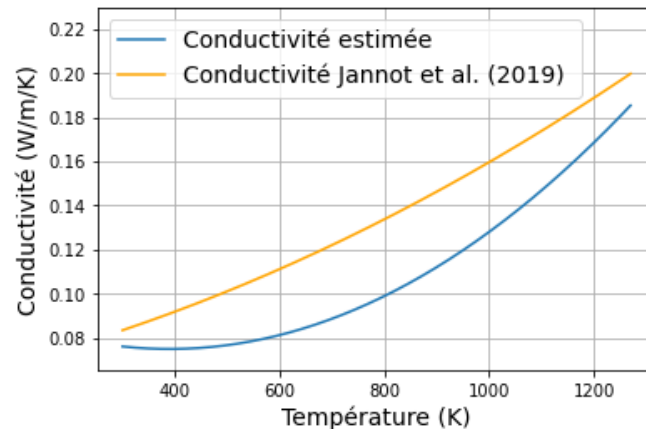
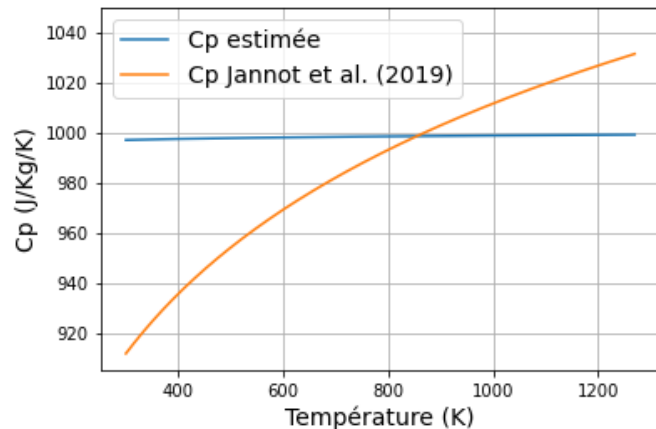
Inversion sur un modèle 3D: flux non homogène

Hypothèse:



- $F = F_{max}(-0.69R^3 + 0.00288R^2 - 0.000754R + 0.00105)$
- Inconnus = {conductivité, C_p , F_{max} , $h_{\text{face avant chauffage}}$, $h_{\text{face avant refroidissement}}$, $h_{\text{face arrière}}$, $h_{\text{latérale}}$ }.
- Contact thermique parfait.

Résultats:



- $h_{\text{face avant chauffage}} = 1.393 \text{ W/m}^2/\text{K}$
- $h_{\text{face avant refroidissement}} = 6.94 \text{ W/m}^2/\text{K}$
- $h_{\text{face arrière}} = 14.9 \text{ W/m}^2/\text{K}$
- $h_{\text{latérale}} = 5.32 \text{ W/m}^2/\text{K}$
- $F = 0.6457$
- **RMSE = 3.98**

Conclusions

- Modèle 1-D: Capable de reproduire les thermogrammes expérimentaux mais avec des écarts dans l'estimation des propriétés (30 % de différence).
 - Meilleurs résultats avec le modèle 3D: différences acceptables entre propriétés mesurées et inversées (2% pour le Cp et 18% pour la conductivité).
 - L'utilisation d'un flux non-homogène améliore les résultats (2% pour le Cp et presque 13% pour la conductivité).
-

○ Perspectives

- Développement d'un modèle hygrothermique.
- Développement d'un modèle cinétique de la dégradation du bois et de la combustion du charbon (ATG).
- Couplage du modèle cinétique avec le modèle hygrothermique et la flamme.



SIMPPÉ



Feux
LABORATOIRE ÉNERGIES MÉCANIQUE
THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

Merci de votre attention.
