Méthodes numériques pour la résolution de l'équation de transfert radiatif : développements récents, modèles, et objectifs

Étude et développement d'un modèle EF de transfert de chaleur multi-physique : application à l'étude de routes solaires hybrides

Nicolas Le Touz[1,2], *Jean Dumoulin*[1,2], *Jean-Michel Piau*[1,3]

[1] *IFSTTAR - Centre de Nantes*
Département COSYS (Composants et Systèmes)
Laboratoire SII (Structures et Intrumentation Intégrée)

[2] *Inria - Centre de Rennes*
Équipe I4S (Inférence Statistique pour la Surveillance et la Sécurité des Structures)

[3] *IFSTTAR - Centre de Nantes*
Département MAST (Matériaux et Structures)
Laboratoire LAMES (auscultation, modélisation, expérimentation des infrastructures de transport)

INVENTEURS DU MONDE NUMÉRIQUE

Journée thématique du groupe « Rayonnement » de la SFT , Paris, le 22 novembre 2017

Plan de l’exposé

- Contexte et position du problème
- Modélisation numérique
- Du modèle à une loi de commande
- Conclusion et perspectives

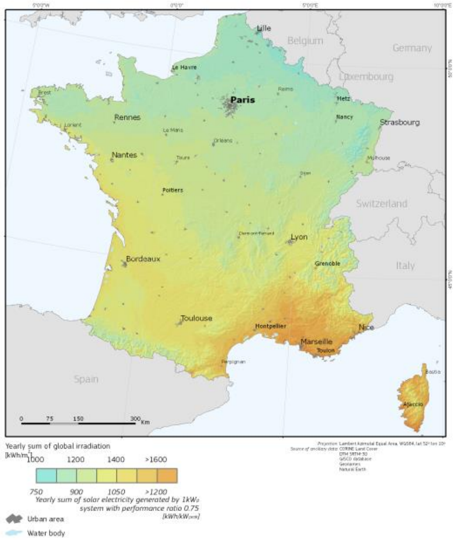
Plan de l’exposé

- Contexte et position du problème
- Modélisation numérique
- Du modèle à une loi de commande
- Conclusion et perspectives

Contexte

Routes de cinquième génération (R5G) : volet environnemental

- Réseau routier en France : ≈ 1 million de km
  - Entretien coûteux ➔ recherche sur des structures à longue durée de vie
  - Nuisances sonores ➔ recherche sur leur réduction
  - Grande surface disponible soumise au rayonnement solaire
    ➔ Recherche sur la récupération d'une partie du rayonnement solaire



Irradiation solaire moyenne de 1981 à 1990
[source : commission européenne]

  - **Maintenance hivernale**
    - Risque de gel et de formation de verglas
      ➔ impact sur la sécurité et l'économie
    - Solution de salage ➔ impact environnemental
  - **Maintenance Estivale**
    - Risque d'orniérage ➔ impact sur la sécurité et l'économie

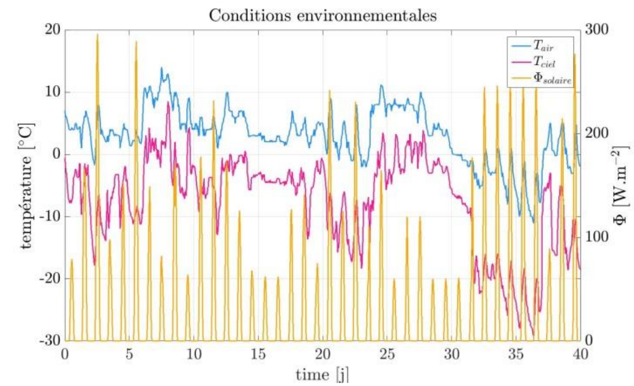
RoSHy@COP21

➔ **Travaux de recherche sur les « *routes à énergie positive* »**

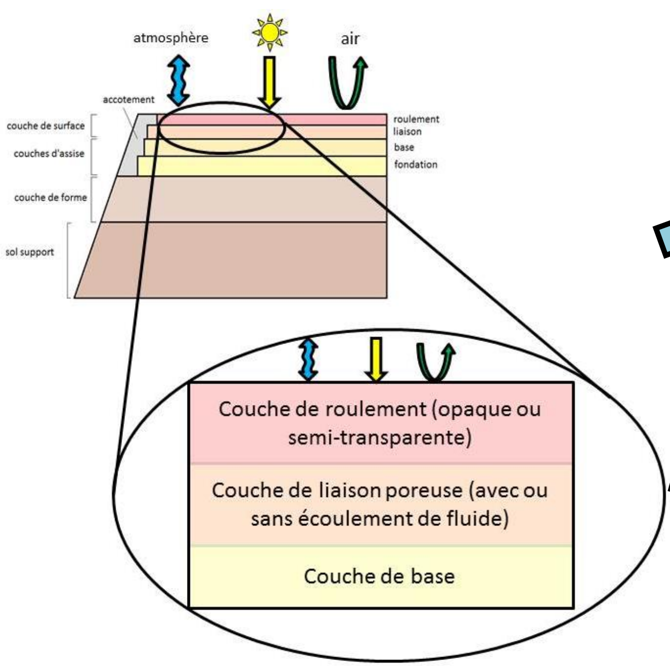
http://www.ifsttar.fr/recherche-expertise/nos-grands-projets/r5g-route-de-5eme-generation/

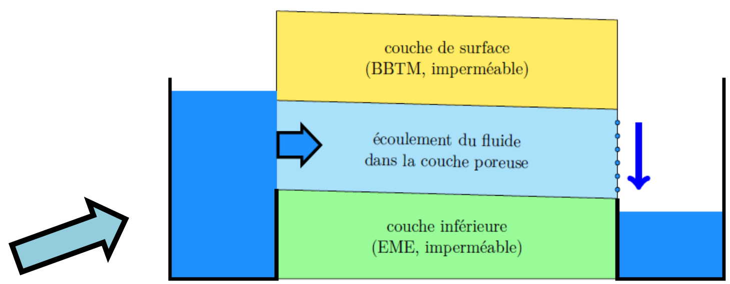
Position du problème

- Étude d'un concept de route énergétique réversible
  - ➔ Siège de phénomènes multi-physiques
  - ➔ Sollicitations environnementales naturelles
- Étude du contrôle commande optimal de tels systèmes

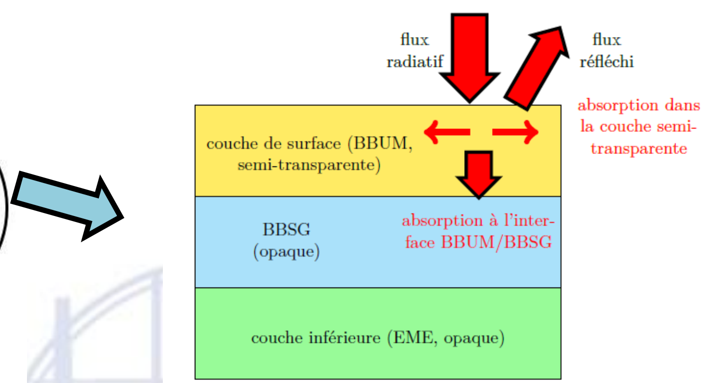


Concept focalisé sur les couches de surface





Couche poreuse : chauffage du fluide par cet l'échangeur thermique



Revêtement semi-transparent : amplification des échanges thermiques

Plan de l’exposé

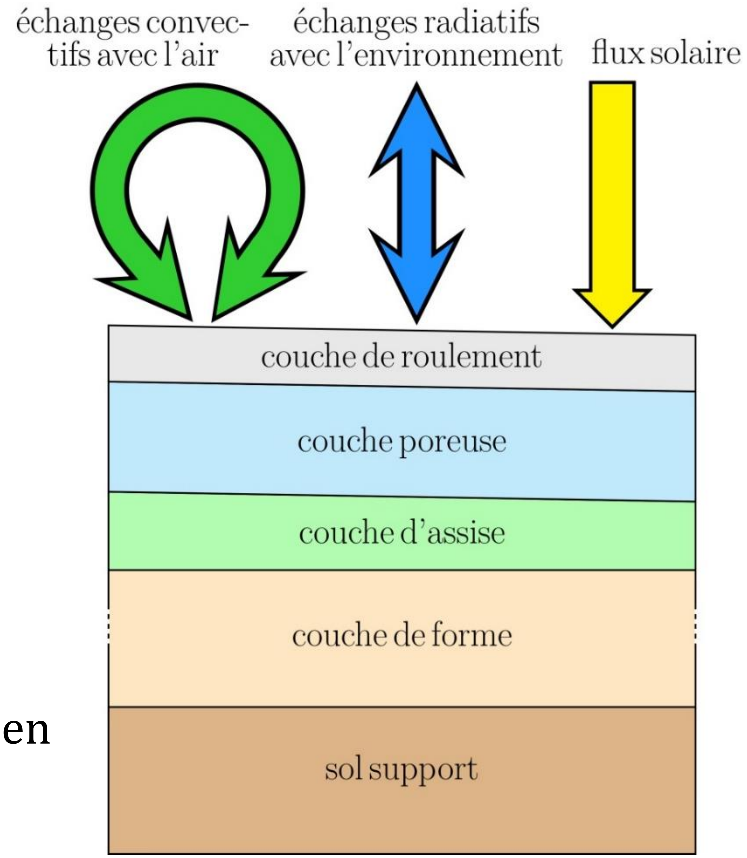
- Contexte et position du problème
- **Modélisation numérique**
  - Diffusion thermique
  - Convection hydraulique
  - Transferts radiatifs
  - Couplage numérique
- Du modèle à une loi de commande
- Conclusion et perspectives

Modélisation de la diffusion thermique

Équation de la chaleur, avec :

- Des échanges avec l'extérieur :
  - Échanges convectifs avec l'air
  - Échanges radiatifs avec le ciel
- Des apports externes :
  - Flux solaire à la surface

  ➔ Terme source dans la couche semi-transparente (effets de l'absorption du rayonnement)



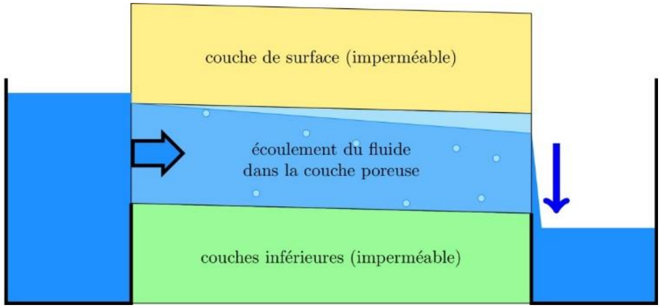
$$\begin{cases} \rho c \dfrac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = q_{rad} \\ k \nabla T \cdot \vec{n} = h_{conv}(T_a - T) + h_{rad}(T_c - T) + \Phi_{sol} \text{ en surface} \end{cases}$$

- ρc : capacité thermique [J.m^{-3}.K^{-1}]
- k : conductivité thermique [W.m^{-1}.K^{-1}]
- T_a, T_c : température de l'air et du ciel [K]
- h_{conv}, h_{rad} : coefficients d'échanges convectif et radiatif [W.m^{-2}.K^{-1}]

➔ Résolution avec la *méthode des éléments finis*

Modélisation de la convection hydraulique (1/2)

Mise en équation



Description locale de l'écoulement avec les équations de Navier-Stokes :

- Conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie

Relations intégrées sur un VER (Volume Élémentaire Représentatif) :

- Obtention d'équations permettant la description à l'échelle macroscopique

Hypothèses : Écoulement stationnaire + vitesse de pore faible et uniforme + couche saturée

- Équation de conservation de la quantité de mouvement devient la loi de Darcy :

$$\vec{u}_D = \frac{K}{\mu_f} \nabla p$$

- Équation de conservation de l'énergie : Transport du fluide : terme d'advection
  - Phase fluide : $\phi(\rho c)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \boxed{(\rho c)_f \vec{u}_D \cdot \nabla T_f} - \phi \nabla \cdot \left(k_f \nabla T_f\right) = \boxed{h\left(T - T_f\right)}$
  - Phase solide : $(1-\phi)\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - (1-\phi)\nabla \cdot (k \nabla T) = \boxed{h\left(T_f - T\right)}$

Échanges d'énergie entre les phases fluide et solide

Modélisation de la convection hydraulique (2/2)

Équation de la phase fluide hyperbolique :

- vitesse d'écoulement trop élevée
- diffusivité trop faible
- maillage mal choisi

➔ Apparition d'oscillations non physiques

Stabilisation :

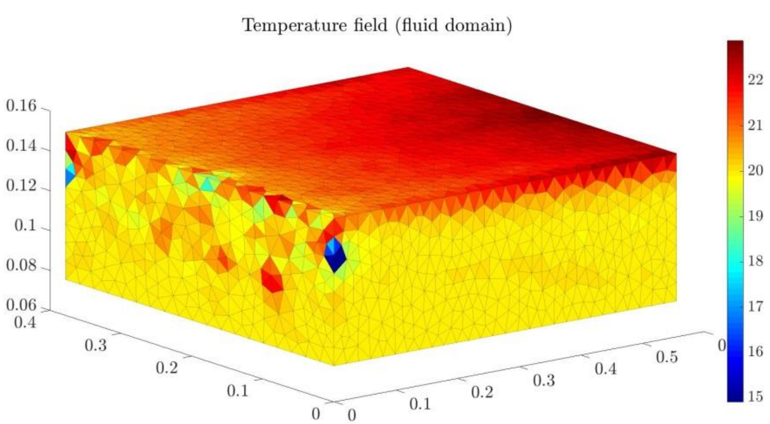
- Ajout de diffusion numérique avec la méthode de Petrov-Galerkin
- Équation de la forme $\mathcal{L}(\vec{u})T = f$

  ➔ Méthode de Galerkin (Éléments finis classiques) : $\langle \mathcal{L}(\vec{u})T - f, \varphi \rangle = 0$

  ➔ Méthode de Petrov-Galerkin : $\langle \mathcal{L}(\vec{u})T - f, \varphi + \delta \vec{u} \cdot \nabla\varphi \rangle = 0,$

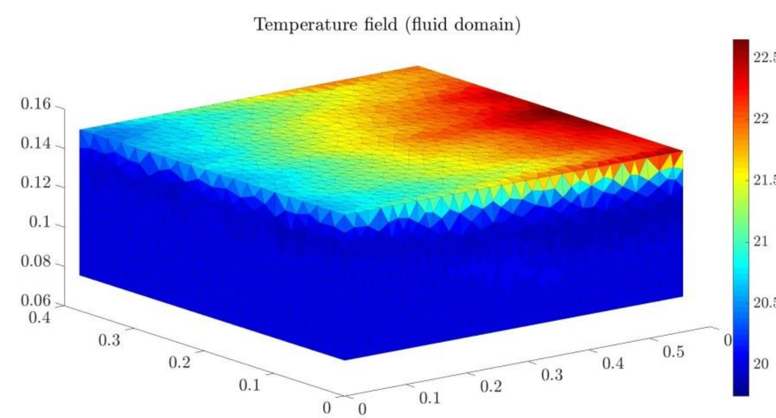
  δ coefficient dépendant de la taille des éléments du maillage

(Galerkin)

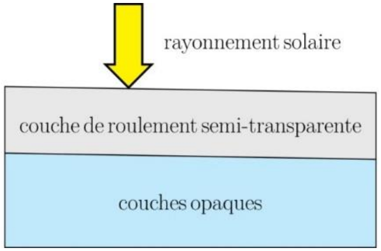


➔

(Petrov-Galerkin)



Modélisation des transferts radiatifs (1/6)



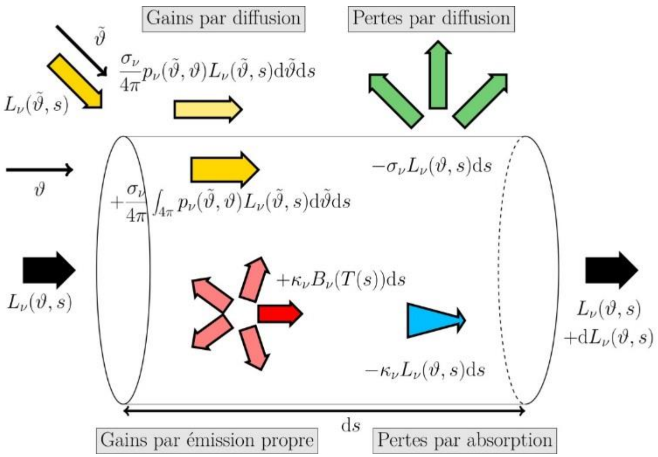
Équation de transfert radiatif (ETR)

- inconnue : luminance $L_\nu(s,\vartheta)$ (flux radiatif par unité d'angle)

$$\vartheta \cdot \nabla L_\nu(s,\vartheta) = -\kappa_\nu L_\nu(s,\vartheta) - \sigma_\nu L_\nu(s,\vartheta) + \kappa_\nu B_\nu\big(T(s)\big) + \frac{\sigma_\nu}{4\pi}\int_{4\pi} p_\nu(\tilde{\vartheta},\vartheta) L_\nu(s,\tilde{\vartheta})\mathrm{d}\tilde{\vartheta}$$

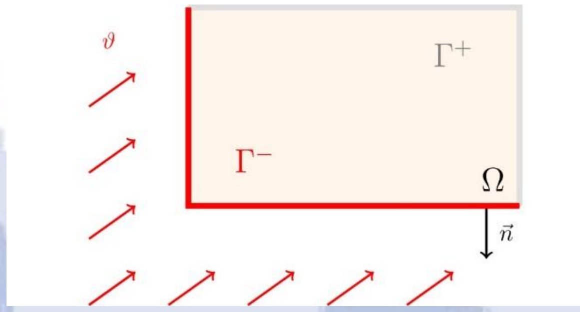
Avec :

- ϑ : direction (vecteur)
- s : position (scalaire) [m]
- L_ν : luminance énergétique monochromatique [W.m^{-2}.sr^{-1}]
- κ_ν : coefficient d'absorption [m^{-1}]
- σ_ν : coefficient de diffusion [m^{-1}]
- $B_\nu(T)$: luminance émise par un corps noir [W.m^{-2}.sr^{-1}]
- $p_\nu(u,v)$: probabilité que le rayonnement provenant de la direction u soit dévié vers la direction v



Conditions limites :

- Définies sur l'entrée de $\partial\Omega \times S^2$ (dans $\mathbb{R}^4$)
- Apports du rayonnement solaire à la surface de la couche semi-transparente



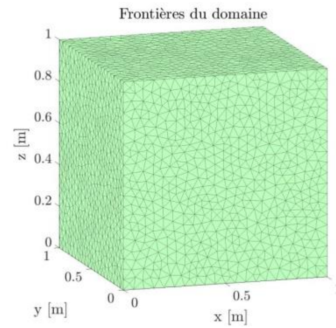
Frontières pour une direction ϑ donnée :

- Entrée : Γ^-: $\vec{n} \cdot \vartheta < 0$
- Sortie : Γ^+ : $\vec{n} \cdot \vartheta \geq 0$

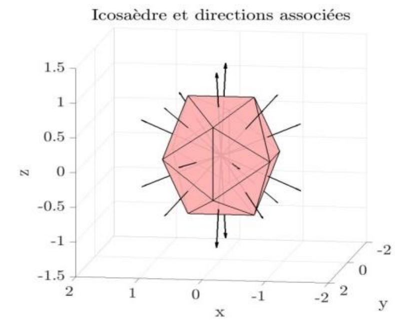
Modélisation des transferts radiatifs (2/6)

Méthode des éléments finis :

- Même maillage que pour le problème de thermique
  - ➔ Affranchissement des interpolations
- Problème spatial et directionnel ➔ inconnues dans $\mathbb{R}^5$
  - ➔ Discrétisation en *position* et en *direction*



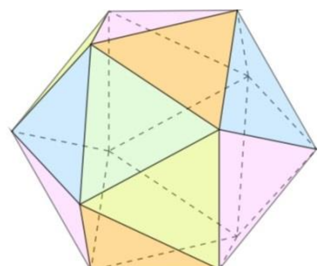
Discrétisation spatiale : x_i



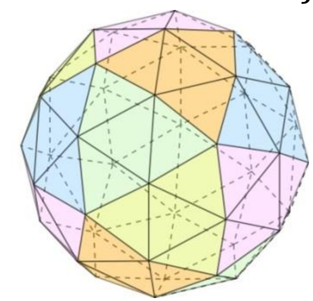
Discrétisation directionnelle : ϑ_j

Discrétisation angulaire **:**

- Éléments basés sur un icosaèdre (polyèdre régulier à 20 faces)
- Méthode des ordonnées discrètes :



raffinement



$$\int_{4\pi} u(\vartheta)d\vartheta \approx \sum_{j=1}^{N_{dir}} w_j u(\vartheta_j) \text{ avec } \sum_{j=1}^{N_{dir}} w_j = 4\pi$$

Obtention d'un système à N_{dir} équations :

$$\mathcal{A}L(x,\vartheta) + \int_{4\pi} g\left(L\left(x,\vartheta,\tilde{\vartheta}\right)\right) \mathrm{d}\tilde{\vartheta} = 0 \ \ ,\forall (x,\vartheta) \in \Omega \times S^2$$

➔ $\mathcal{A}L\left(x,\vartheta_j\right) + \sum_{k=1}^{N_{dir}} w_i g\left(L\left(x,\vartheta_j,\vartheta_k\right)\right) = 0 \ \ ,\forall (x,j) \in \Omega \times [|1, N_{dir}|]$

Modélisation des transferts radiatifs (3/6)

Discrétisation spatiale :

- Formulation faible de l'ETR :

$$\boxed{\langle \mathcal{A}L(\cdot,\vartheta_j),\varphi\rangle_\Omega} + \boxed{\langle \mathcal{B}L(\cdot,\vartheta_j),\varphi\rangle_{\partial\Omega}} = \boxed{\langle f_j,\varphi\rangle_\Omega}, \forall k \in [|1, N_{dir}|], \forall\varphi$$

ETR après la discrétisation directionnelle :

$$\mathcal{A}L(x,\vartheta_j) = f_j \;, \forall x \in \Omega$$

Conditions limites :

$$\mathcal{B}L(x,\vartheta_j) = 0 \;, \forall x \in \partial\Omega$$

- ETR hyperbolique, même structure que l'équation de convection hydraulique
  - Galerkin ➔ risque d'apparition d'oscillations non physiques

  ➔ ajout d'un terme de diffusion numérique (Petrov-Galerkin) : $\varphi \to \varphi + \delta\vartheta_j \cdot \nabla\varphi$

  ➔ Direction d'étude ϑ_j est analogue à la vitesse d'écoulement $\vec{u}$ de la convection hydraulique

  ➔ Formulation de Petrov-Galerkin :

$$\langle \mathcal{A}L(\cdot,\vartheta_j),\varphi + \delta\vartheta_j \cdot \nabla\varphi\rangle_\Omega + \langle \mathcal{B}L(\cdot,\vartheta_j),\varphi\rangle_{\partial\Omega} = \langle f_j,\varphi + \vartheta_j \cdot \nabla\varphi_j\rangle_\Omega$$
$$\forall k \in [|1, N_{dir}|], \forall\varphi$$

Modélisation des transferts radiatifs (4/6)

Formulation finale

- Système à $(N_{dir} \times N_{positions})$ inconnues du type :

$$\big(\mathcal{T} + \mathcal{M}(\kappa_\nu) + \mathcal{S}(\sigma_\nu) + \mathcal{R}(\rho_\nu)\big)L_\nu = \mathcal{M}(\kappa_\nu)B_\nu(T) + \mathcal{Q}G$$

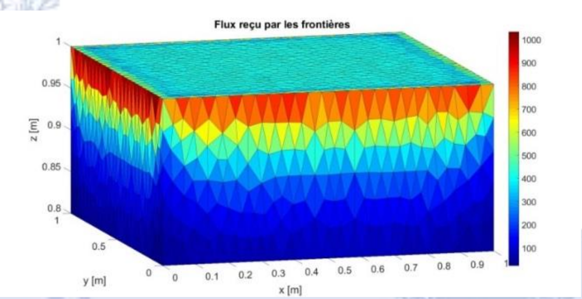
Variations d'énergie radiative | Effets de l'absorption | Effets de la diffusion | Effets de la réflexion | Gains par émission interne | Apports externes (rayonnement solaire)

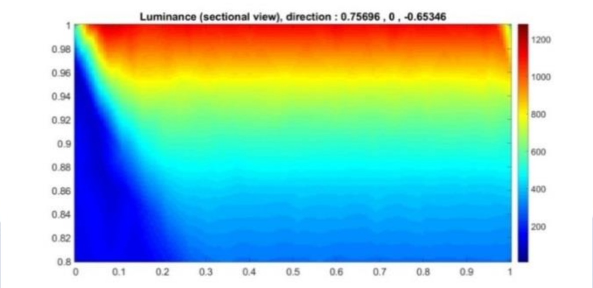
- Solution réinjectée dans l'équation de la diffusion sous la forme de termes sources :

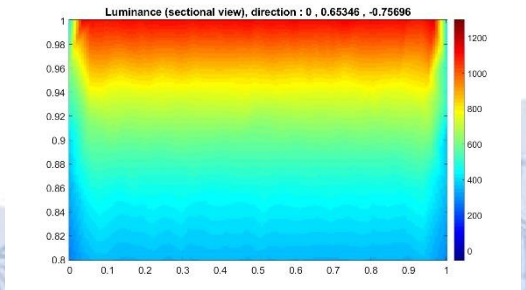
$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = q_{rad} \quad \text{et} \quad k\nabla T \cdot \vec{n} = \Phi_{ext} + \Phi_{rad} \quad \begin{matrix}\text{sur les frontières} \\ \text{opaque / semi–transparent}\end{matrix}$$

Avec :

$$q_{rad} = -\nabla \cdot \left(\int_{\nu=0}^{+\infty} \int_{4\pi} L_\nu(s,\vartheta)\vartheta \mathrm{d}\vartheta \mathrm{d}\nu \right) \qquad \Phi_{rad} = \int_{4\pi} L_\nu(s,\vartheta)(\vartheta \cdot \vec{n})\mathrm{d}\vartheta$$



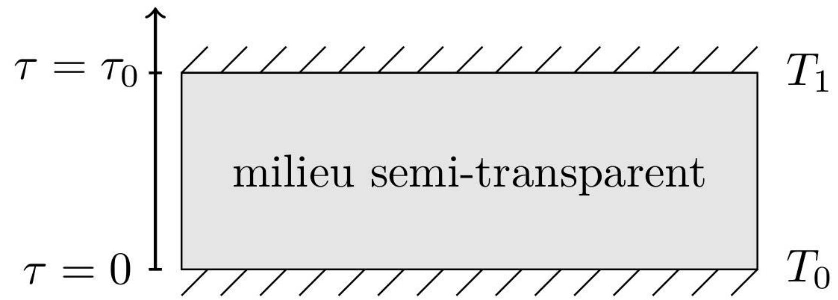




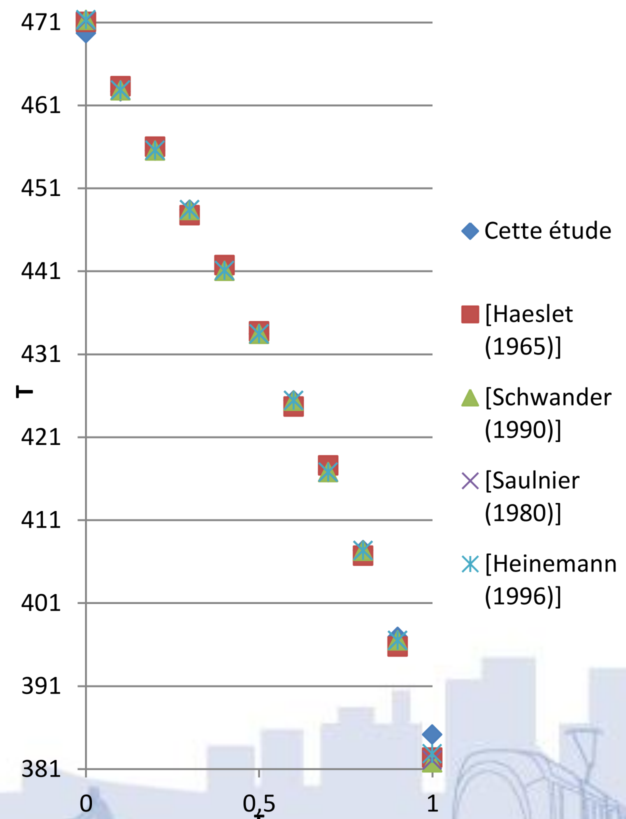
Modélisation des transferts radiatifs (5/6)

Cas test N°1 (en considérant 20 directions)

- Milieu semi-transparent homogène non diffusant (ni thermique ni optique), en régime permanent
- $T_0 = 500$ K, $T_1 = 300$ K
- Absorption uniforme
- Épaisseur optique : $\tau_0 = 1$



τ	Cette étude	[Haeslet (1965)]	[Schwander (1990)]	[Saulnier (1980)]	[Heinemann (1996)]
0	469,69	471,03	471,29	471,21	471,31
0,1	462,68	463,29	462,79	462,82	462,83
0,2	455,54	456,01	455,54	455,56	455,57
0,3	448,41	447,76	448,38	448,39	448,39
0,4	441,09	441,73	441,05	441,06	441,07
0,5	433,45	433,75	433,43	433,45	433,45
0,6	425,40	424,67	425,39	425,41	425,42
0,7	416,77	417,57	416,76	416,78	416,79
0,8	407,37	406,70	407,30	407,32	407,33
0,9	396,89	395,75	396,50	396,49	396,50
1,0	385,13	382,36	381,80	382,04	382,83



➔ Écart inférieur à 1 %

[Haeslet (1965)] : M. A. Haeslet et R. F. Warming : Radiative transport and wall temperature slip in an absorbing planar medium. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8:979–994, 1965.

[Schwander (1990)] : D. Schwander, G. Flamant et G. Olalde : Effects of boundary properties on transient temperature distributions in condensed semi-transparent media. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 33(8):1685–1695, 1990

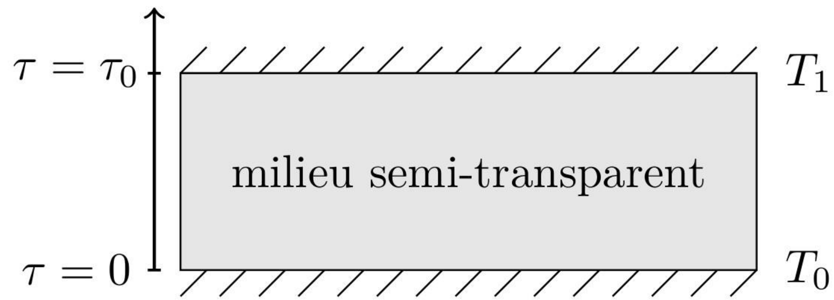
[Saulnier (1980)] : J. B. Saulnier et J. Martinet : Le verre et la thermocinétique des matériaux semitransparents. *Revue de physique appliquée*, 15:175–188, 1980

[Heinemann (1996)] : U. Heinemann et R. Caps : Radiation-conduction interaction : an investigation on silica aerogels. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 39(10):2115–2130, 1996

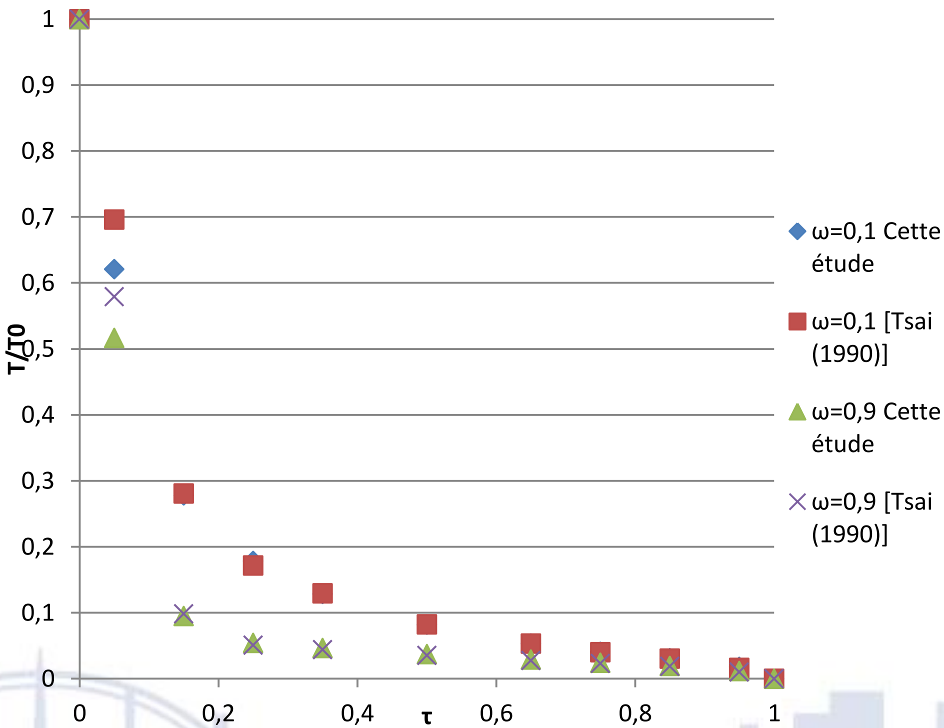
Modélisation des transferts radiatifs (6/6)

Cas test N°2 (en considérant 20 directions)

- Milieu semi-transparent homogène diffusant, en régime transitoire
- Paramètre de conduction-radiation :
  $N = \dfrac{k\beta}{4n^3\sigma_{stefan}T_0^3} = 0{,}01$
- Temps adimensionné : $\xi = \dfrac{k\beta^2 t}{\rho c} = 0{,}01$
- Albédo de diffusion : $\omega = \dfrac{\sigma}{\beta}$ =0,1 ou 0,9
- Épaisseur optique : $\tau_0 = 2$
- $T_1 = 0$, étude de $T(\tau)/T_0$



τ/τ_0	$\omega = 0{,}1$		$\omega = 0{,}9$	
	Cette étude	[Tsai (1990)]	Cette étude	[Tsai (1990)]
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,05	0,6209	0,6961	0,5167	0,5791
0,15	0,2778	0,2809	0,0948	0,0982
0,25	0,1785	0,1717	0,0542	0,0508
0,35	0,1284	0,1294	0,0466	0,0440
0,5	0,0817	0,0822	0,0372	0,0353
0,65	0,0534	0,0532	0,0291	0,0277
0,75	0,0406	0,0402	0,0242	0,0231
0,85	0,0308	0,0302	0,0194	0,0186
0,95	0,0179	0,0161	0,0114	0,0101
1,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000



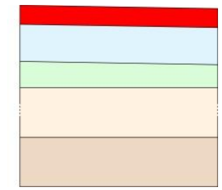
➔ Écart inférieur à 2 % ($\omega = 0.1$) et 5 % ($\omega = 0.9$) entre $\tau = 0{,}15\tau_0$ et $\tau = 0{,}85\tau_0$

[Tsai (1990)] : J.-H. Tsai et J.-D. Lin : Transient combined conduction and radiation with anisotropic scattering. *J. Thermophysics*, 4(1), 1990

Schéma du couplage numérique (1/2)

Mise en œuvre

- À chaque itération temporelle :
  - Résolution de l'équation de transfert radiatif



$$\big(\mathcal{T} + \mathcal{M}(\kappa_\nu) + \mathcal{S}(\sigma_\nu) + \mathcal{R}(\rho_\nu)\big)L_\nu = \mathcal{M}(\kappa_\nu)B_\nu(T) + \mathcal{Q}G$$

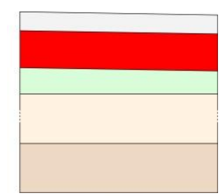
  - Calcul des termes source :

$$q_{rad} = -\nabla \cdot \left(\int_{\nu=0}^{+\infty} \int_{4\pi} L_\nu(s,\vartheta)\vartheta \mathrm{d}\vartheta \mathrm{d}\nu \right), \qquad \Phi_{rad} = \int_{4\pi} L_\nu(s,\vartheta)\vartheta \cdot \vec{n} \mathrm{d}\vartheta$$

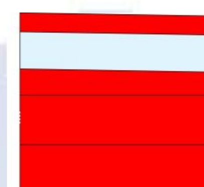
  - Injection dans l'équation de la diffusion :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k\nabla T) = q_{rad}\,, \qquad k\nabla T \cdot \vec{n} = \Phi_{ext} + \Phi_{rad}$$

  - Résolution du système :



$$\left.\begin{aligned} &\phi(\rho c)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c)_f \vec{u}_D \cdot \nabla T_f - \phi\nabla \cdot \big(k_f \nabla T_f\big) = h\big(T - T_f\big) \\ &(1-\phi)\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - (1-\phi)\nabla \cdot (k\nabla T) = h\big(T_f - T\big) \end{aligned}\right\} \text{Couche poreuse}$$



$$\left.\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k\nabla T) = q_{rad}\right\} \text{Reste du domaine}$$

➔ Champ de températures au pas de temps suivant

Schéma du couplage numérique (2/2)

Simplifications possibles

- ETR en 5 dimensions
  - 3 spatiales (comme pour la diffusion et la convection hydraulique)
  - 2 directionnelles
  - ➔ Système de taille $N_{dir} \times$ taille(diffusion)
  - ➔ Temps de calcul importants

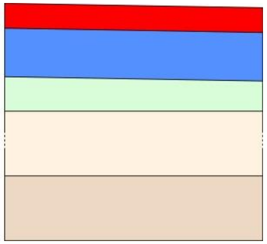
- Hypothèses de simplification :
  - Matériau semi-transparent à basse longueurs d'onde (rayonnement solaire)
  - Matériau opaque aux grandes longueurs d'onde (rayonnement à température ambiante)
  - ➔ En première approche : émissions propres internes négligeables

$$\big(\mathcal{T} + \mathcal{M}(\kappa_\nu) + \mathcal{S}(\sigma_\nu) + \mathcal{R}(\rho_\nu)\big)L_\nu = \cancel{\mathcal{M}(\kappa_\nu)B_\nu(T)} + \mathcal{QG}$$

  - ➔ Terme source réduit aux apports externes $\mathcal{QG}$ (rayonnement solaire)

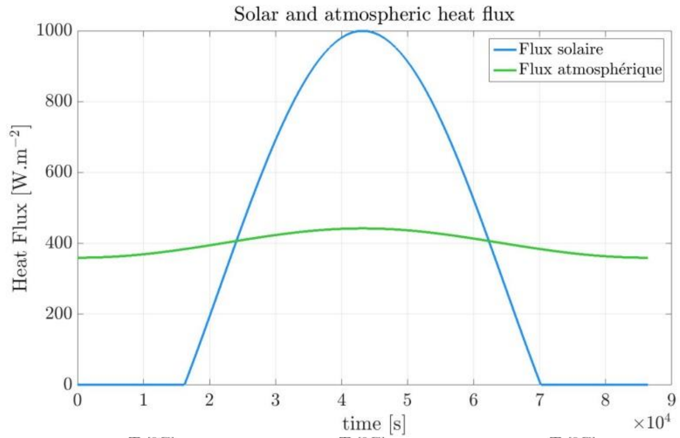
- Autre possibilité :
  - Effets de bord négligés : L_ν
  - ➔ Calcul du L_ν en considérant deux plaques planes parallèles avec
    - La méthode des éléments finis
    - Ou une solution analytique 1D

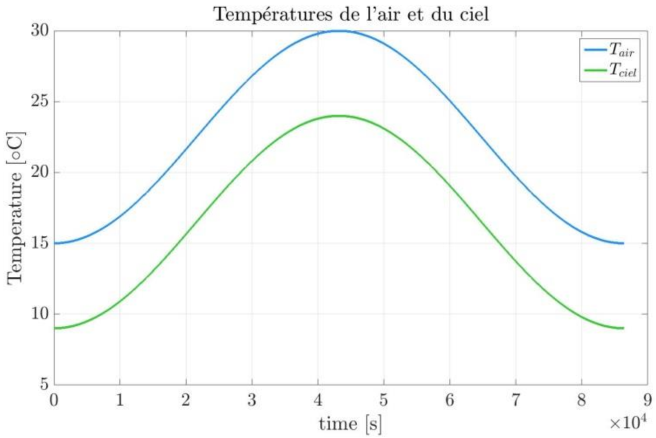
Résultats en régime périodique établi



Comparaison des effets des revêtements opaque et semi-transparent

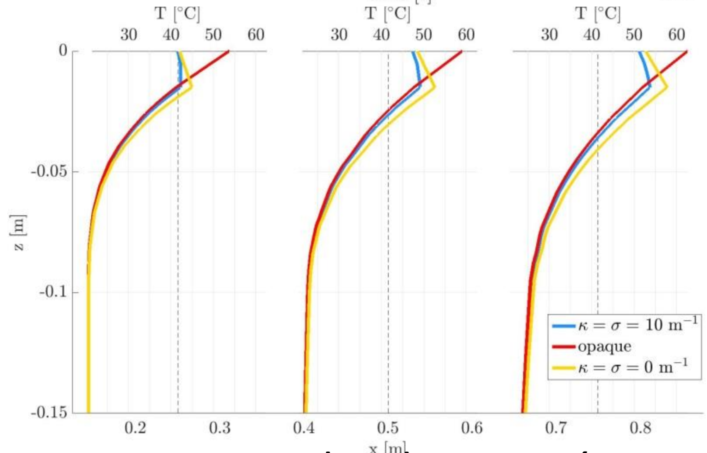
Conditions environnementales estivales :



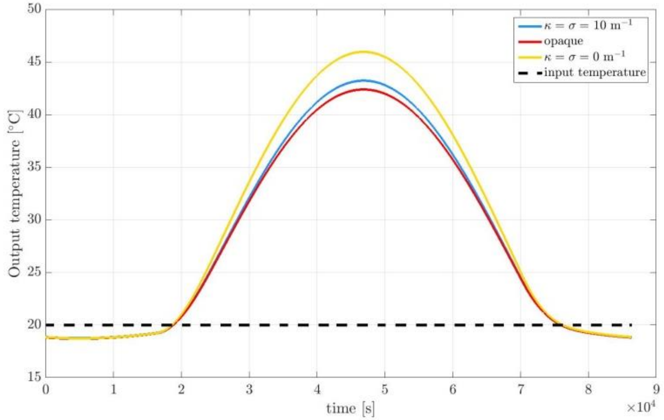


Effets sur le fluide et la structure :

- Rouge : opaque
- Bleu : semi-transparent
- Jaune : transparent



Coupes verticales des températures



Température du fluide après 1 mètre

Énergie potentiellement récupérable sur le premier mètre :

- Opaque : 5,93 kWh
- Semi-transparent : 6,66 kWh (+ 12 %)
- Transparent : 7,43 kWh (+ 25 %)

Plan de l'exposé

- Contexte et position du problème
- Modélisation numérique
- Du modèle à une loi de commande
- Conclusion et perspectives

Étude d'une loi de commande (1/2)

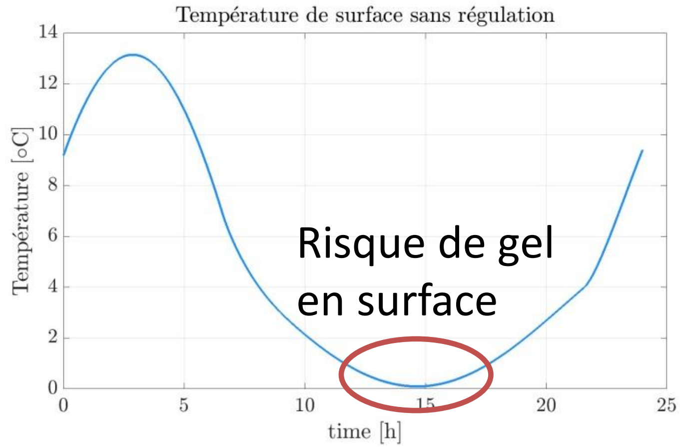
- Température de surface $T_S \geq \theta_{min}$ ($\theta_{min} > 0$ permettant d'assurer une sécurité par rapport au risque de gel)

  ➔ fonctionnelle s'écrivant sous la forme :

$$J_{res}(T_{f0}) = \frac{1}{2}\|\min(0, T_S - \theta_{min})\|_{\mathcal{M}}^2$$

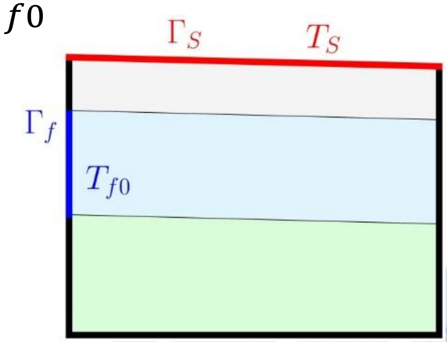
Avec :

$\mathcal{M}$: espace des mesures, avec la norme $\|v\|$



- *Régularisation et minimisation des apports énergétiques* nécessaires au chauffage du fluide
  - Bruit dans les données mesurées ➔ instabilités
  - Température initiale du fluide : $T_{f,ref}$ puis chauffage jusqu'à T_{f0}

  ➔ fonctionnelle s'écrivant sous la forme :



$$J_{energ}(T_{f0}) = \frac{\varepsilon}{2}\|T_{f0} - T_{f,ref}\|_{\mathcal{U}}^2$$

Avec :

ε : paramètre de Tikhonov

$\mathcal{U}$: espace des paramètres, avec la norme $\|u\|_{\mathcal{U}}^2 = \int_{t=0}^{t_a} u^2 \, \mathrm{d}t$

Étude d'une loi de commande (2/2)

➔ ***Fonctionnelle à minimiser :***

$$J(T_{f0}) = \frac{1}{2}\|\mathbf{min}(0, T_S - \theta_{min})\|_{\mathcal{M}}^2 + +\frac{\varepsilon}{2}\|T_{f0} - T_{f,ref}\|_{\mathcal{U}}^2$$

➔ recherche de $u = \arg\min_{\tilde{u}\in\mathcal{U}} J(\tilde{u})$

- Application pour cela d'une méthode de gradient (gradient conjugué par exemple)

➔ Gradient de J nécessaire

- Expressions simples pour les composantes écrites dans $\mathcal{U}$
- Gradient du terme de résidu $\frac{1}{2}\|\min(0, T_S - \theta_{min})\|_{\mathcal{M}}^2$?

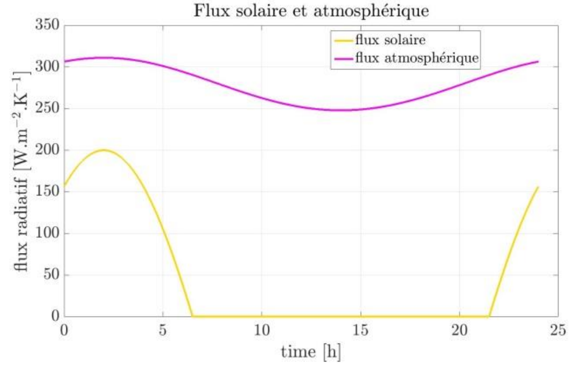
➔ Application de la *méthode de l'état adjoint*

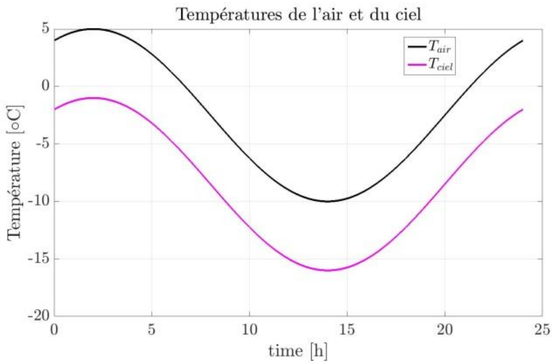
- Trois problèmes à résoudre : *problème direct, problème linéaire tangent* et *problème adjoint (résolution s'appuyant sur le modèle multi-physique présenté précédemment)*

Étude d'une loi de commande : Résultats (1/2)

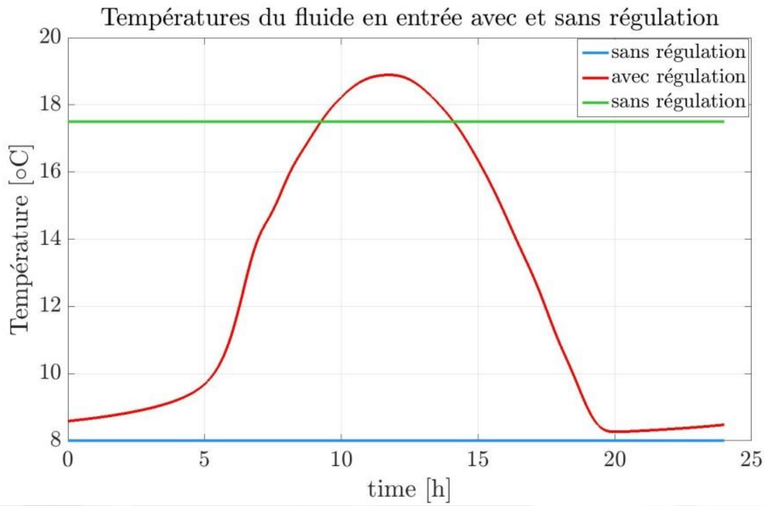
- ***Cas d'étude en régime périodique établi***
  - $T_{f0} = 8$°C (avant chauffage, courbes bleues)
  - $T_{f0} = 17{,}5$°C (T minimale telle que $T_{surf} \geq 4$°C, courbes vertes)
  - $T_{f0} = \arg\min_{u} J(u)$ (telle que $T_{surf} \geq 4$°C, courbes rouges)

Conditions environnementales :

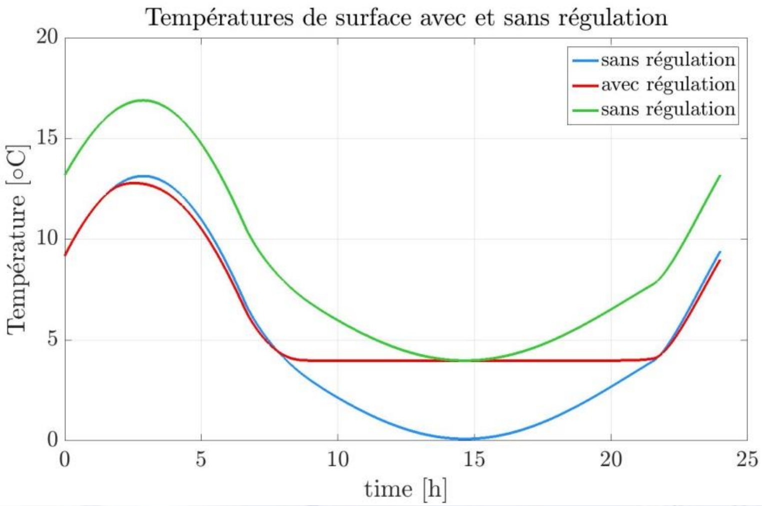




Longueur de l'écoulement : 1,2 m



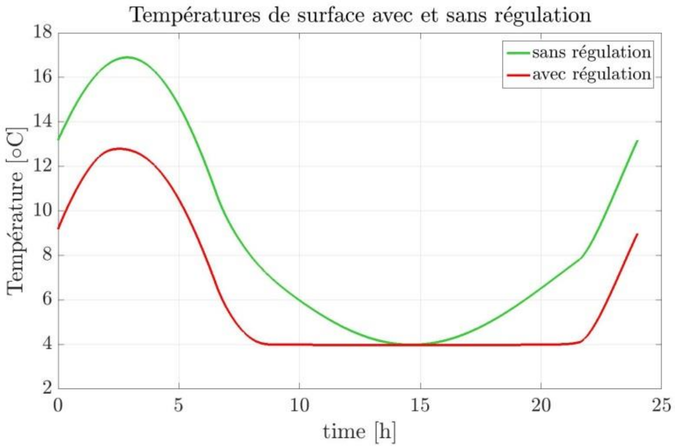
Température d'entrée du fluide

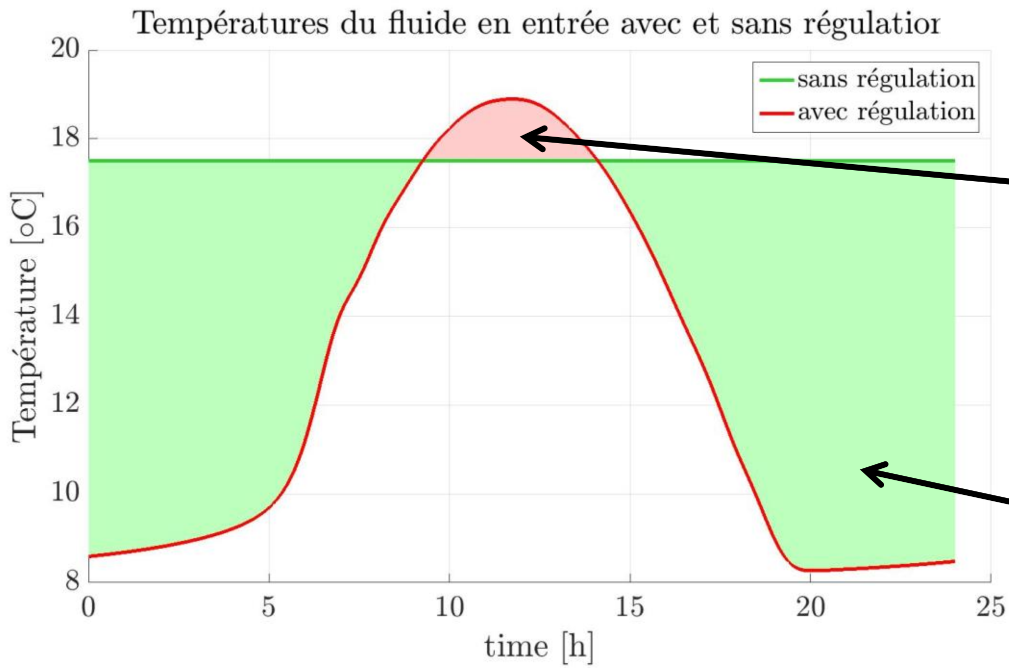


Température de surface (en un point)

Étude d'une loi de commande : résultats (2/2)

- ***Comparaison de deux scenarii***
  - Dépenses énergétiques :
    - Avec $T_{f0} = cte$: 6,35 kWh/m²
    - Avec T_{f0} régularisée : 3,03 kWh/m²
  - Gains énergétiques avec cette régulation : 3,32 kWh/m²





Perte énergétique (T_{f0} plus élevée avec la régulation)

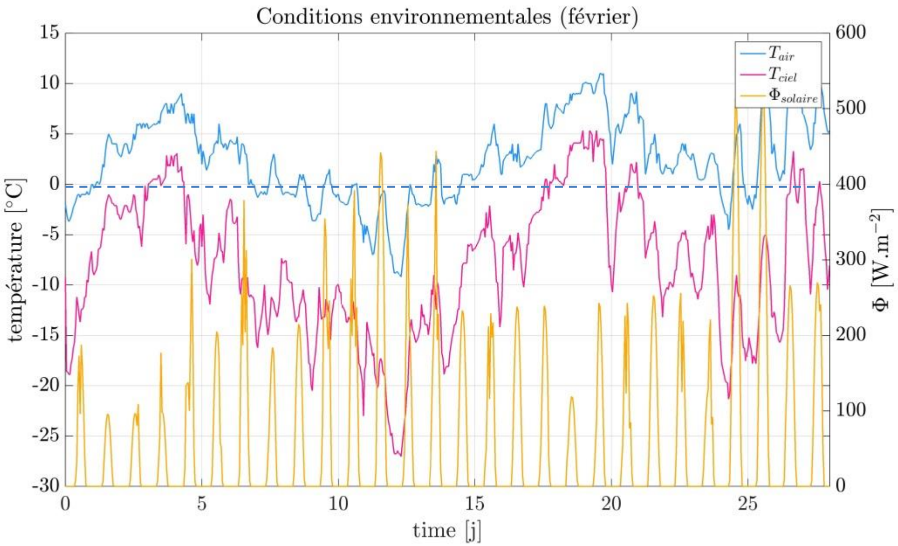
Gain énergétique (T_{f0} plus basse avec la régulation)

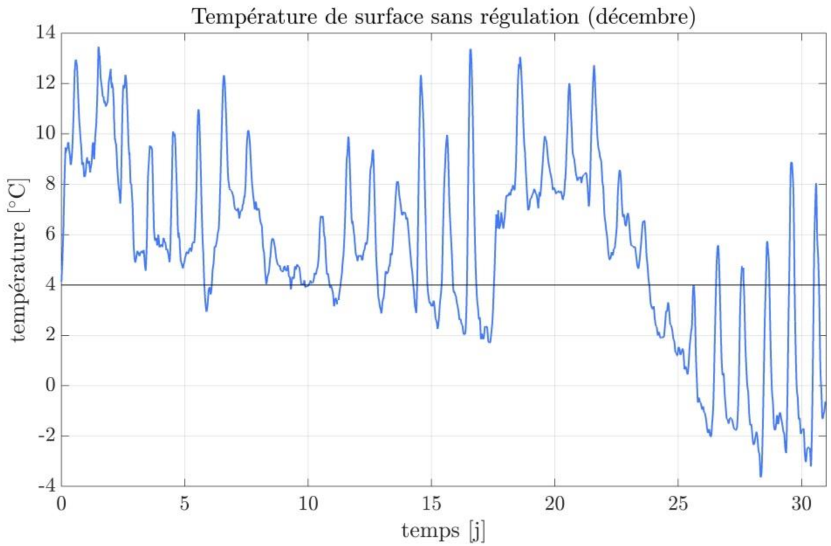
Étude d’une loi de commande : Résultats (1/2)

- ***Utilisation de données météorologiques sur un mois : simulation d’une prédiction sur quatre jours avec un glissement au pas d’un jour***
  - Principe : Pour chaque jour

  ➔ Calcul de la température d’entrée du fluide sur 4 jours

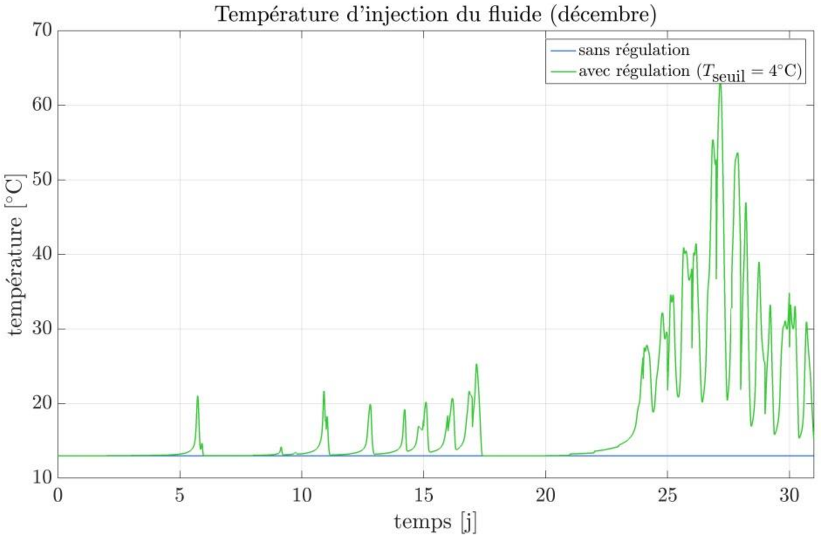
  ➔ Seule la première journée est conservée, permettant de calculer le nouvel état thermique du système
  - Température d’entrée : 13°C, longueur de l’écoulement : 2 mètres

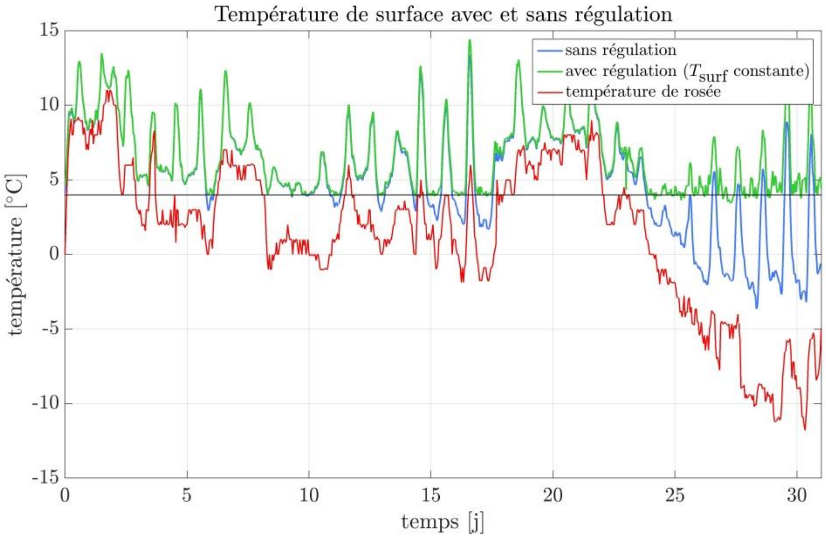




Étude d'une loi de commande : résultats (2/2)

- ***Utilisation de prédictions météorologiques sur quatre jours glissants : résultats***





Dépense énergétique pour le chauffage du fluide : 60 kWh/m² sur ces 31 jours
➔ Amélioration : Utiliser une température cible liée à la température de rosée, et non plus constante (ici égale à 4°C) : l'augmentation à 60°C de la température d'entrée ne serait plus nécessaire, le point de rosée étant plus bas.

Plan de l'exposé

- Contexte et position du problème
- Modélisation numérique
- Du modèle à une loi de commande
- Conclusion et perspectives

Conclusion

- Développement d'un modèle multi-physique : route solaire hybride
  - ✓ Modélisation 2D et 3D de la diffusion thermique, de la convection hydraulique, des transferts radiatifs et couplage des modèles
  - ✓ Étude et développement d'un modèle éléments finis sur un noyau Matlab
  - ✓ Génération du maillage de la géométrie étudiée en utilisant le logiciel libre Gmsh
  - ✓ En première approche, choix d'une formulation avec des éléments P1
  - ✓ Étude et intégration de conditions aux limites variables avec un pas de temps fin (~ 10 min) pouvant s'étendre à un intervalle de temps annuel (voire plus)
- Développement d'une loi de commande
  - ✓ Cas d'étude : mise hors gel de la surface d'une route solaire hybride
  - ✓ Étude d'une régulation s'appuyant sur le contrôle de la température d'entrée du fluide

Perspectives

- Validation expérimentale des modèles
  - ✓ Banc d'essais en laboratoire
  - ✓ Site expérimental
- Amélioration du modèle numérique
  - ✓ Éléments P2
  - ✓ Modélisation en considérant un mélange « Liant – Granulats » au niveau de la couche de surface semi-transparente
  - ✓ Introduction de l'effet des hydrométéores en surface

Merci de votre attention

IFSTTAR
[1] *Département COSYS « Composants et Systèmes » -* *http://www.cosys.ifsttar.fr/linstitut/cosys/*
[2] *Département MAST « Matériaux et Structures » -* *http://www.mast.ifsttar.fr/linstitut/mast/*

IFSTTAR - Inria
[3] *Équipe I4S « Inférence Statistique pour la Surveillance et la Sécurité des Structures » -* *https://www.inria.fr/en/teams/i4s*

Contacts :
nicolas.le-touz@ifsttar.fr or jean.dumoulin@ifsttar.fr or jean-michel.piau@ifsttar.fr