

# Dalles ventilées

## Modélisation, contrôle, optimisation

Présenté par  
**Mathieu Labat**

Collaborateurs  
**Ion Hazyuk (ICA)**  
**Clément Nevers**  
**Bassim Maaloul**  
**Alexandre Malley-Ernewein**

Réunion technique AICVF 29/03 /2023



## Villa gallo-romaine de Séviac (32)



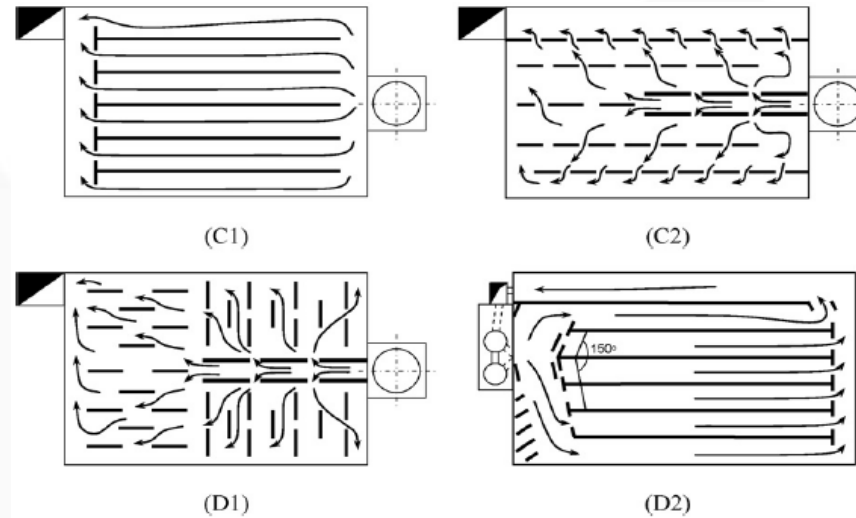
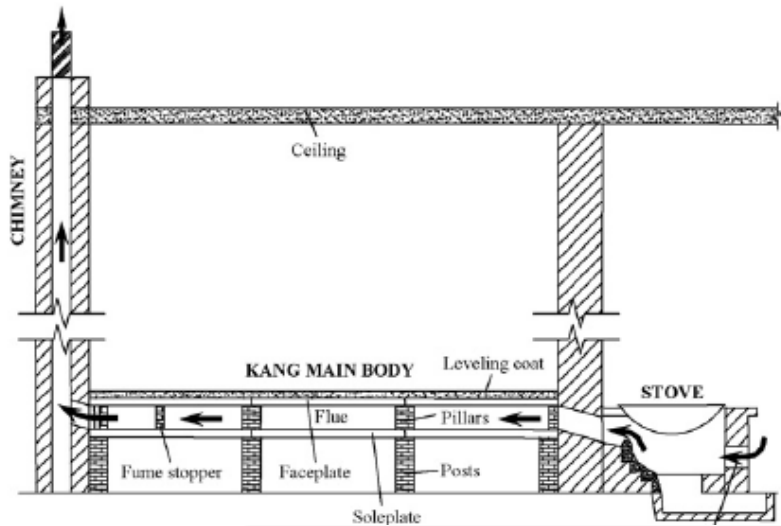
L'hypocauste assure une circulation d'air chaud, sous le sol et dans les murs [...] à partir d'un foyer ouvert situé dans une petite salle de service. Il existe des hypocaustes à canaux ou à pilettes hautes de 50 à 90 cm, constituées de briques superposées. Elles soutiennent de grandes dalles sous lesquelles l'air chaud circule.



*Guide de la villa de Séviac*

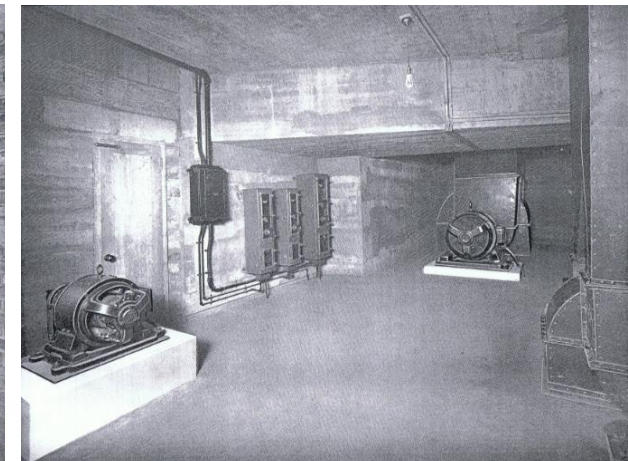
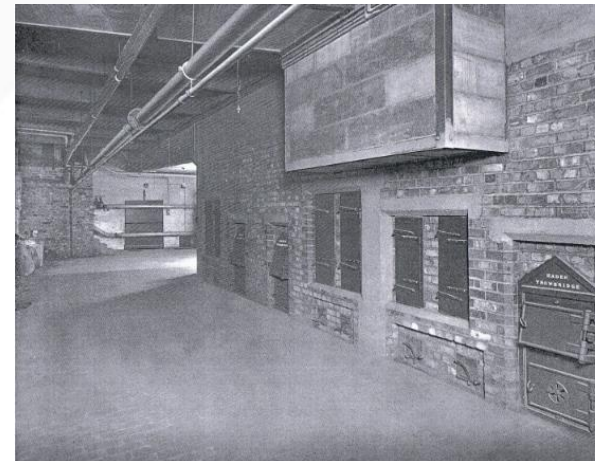
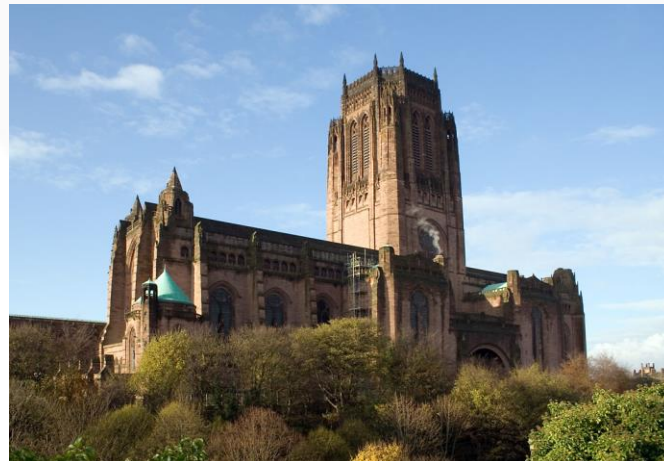


## L'équivalent asiatique : kang (Chine), ondol (Corée)



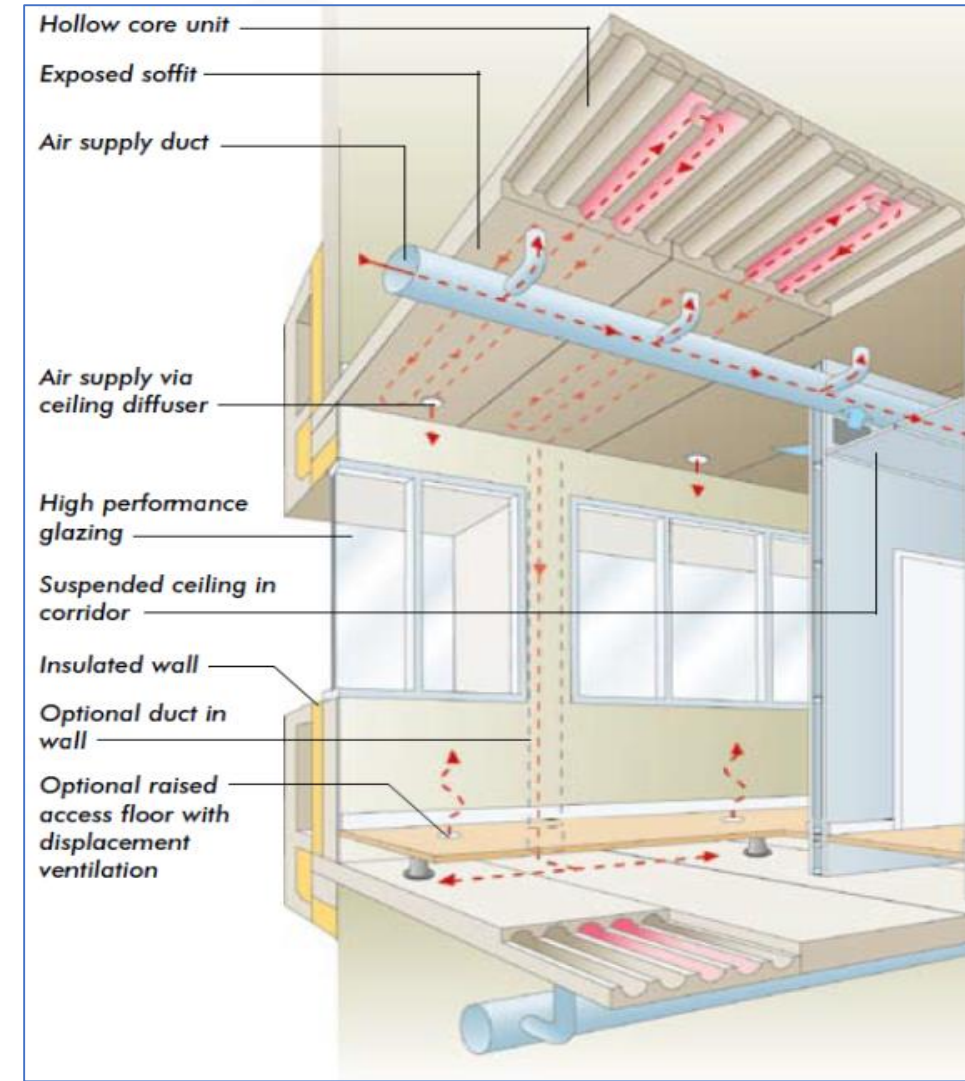
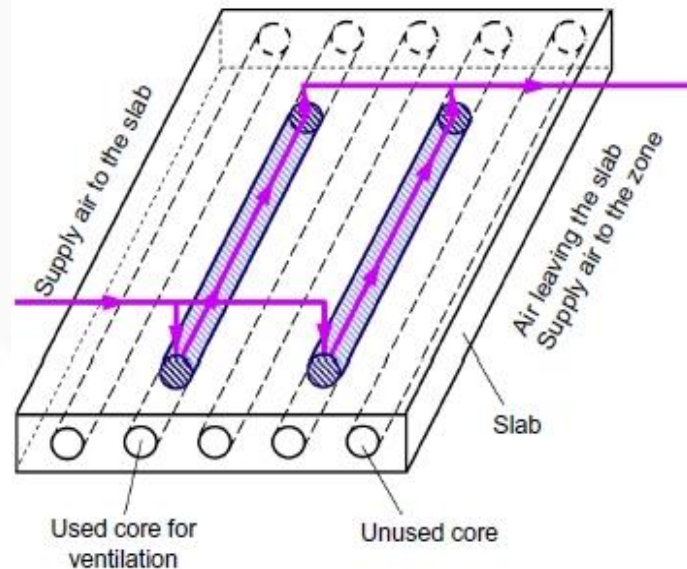
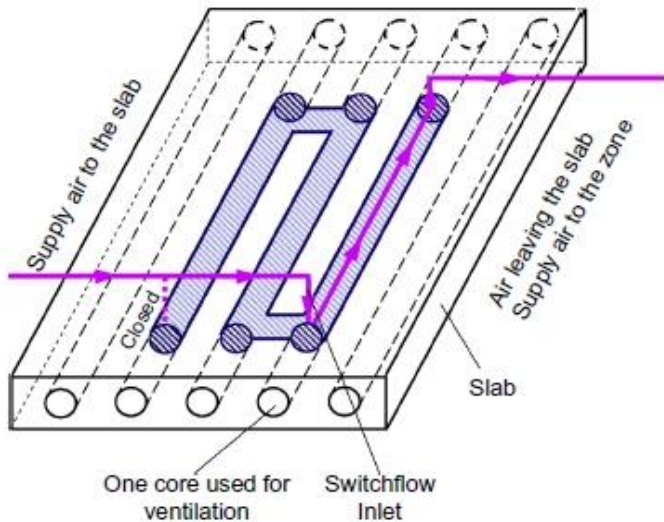
Zhuang, Z., Li, Y., Chen, B., Guo, J., 2009. Chinese kang as a domestic heating system in rural northern China—A review. *Energy Build.* 41, 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.013>

## Cathédrale de Liverpool (XX<sup>e</sup>)



Thermodeck (années 2000) – la première dalle ventilée ?

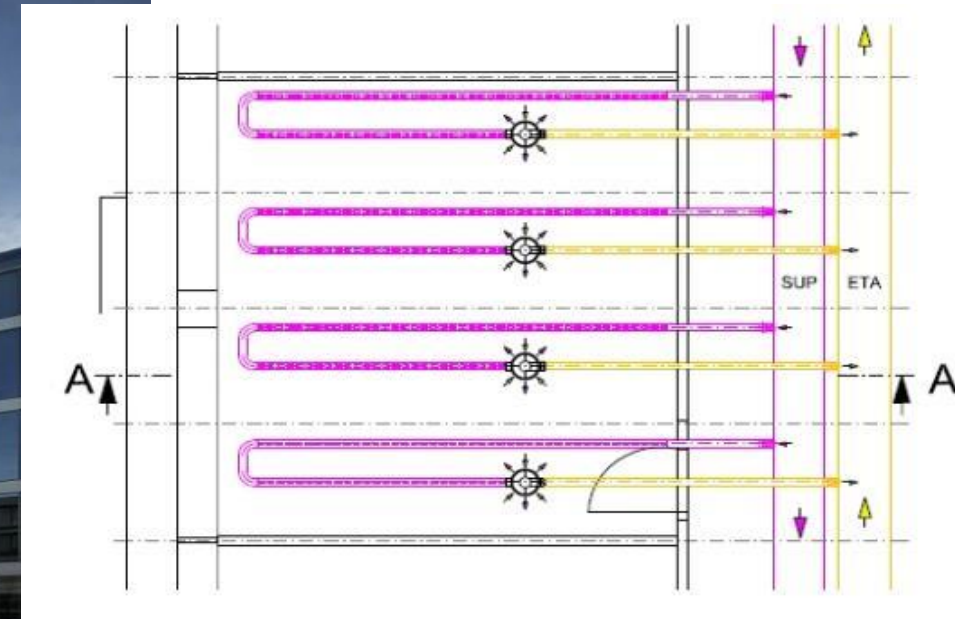
- Commercialisé en Grande Bretagne
- Utilisation de dalles alvéolées préfabriquées
- Percement à des positions stratégiques pour insuffler l'air dans la dalle / le diffuser dans le local
- Plusieurs réalisations, de la diffusion scientifique





## Concretcool (années 2010)

- Commercialisé en Allemagne par la société KIEFERKLIMA
- Gaines aluminium avec ailettes sur la surface intérieure
- Plusieurs réalisations, peu de diffusion scientifique



L'idée d'origine [...] consiste à optimiser la hauteur sous plafond en utilisant une dalle active ventilée, d'épaisseur conventionnelle mais qui intégrerait les gaines. L'air utilisé comme fluide caloporteur transmettrait ainsi sa chaleur ou sa fraîcheur au béton qui agirait comme un plafond rayonnant. Grâce à ce procédé, il est possible de gagner 40 centimètres de hauteur dans la zone d'occupation où la dalle béton apparaît nue et donc, de construire davantage d'étages dans un même volume. On gagne un étage à partir de R+7/8.



*Paru dans Batiactu le 07/06/2017*

Entreprise	Laboratoire
Mise en œuvre	x
Arguments techniques	Mise en œuvre de différentes stratégies énergétiques
Arguments économiques	Estimation de la consommation énergétique
Satisfaction client	Estimation du confort (conditions hygrothermiques intérieures)



## Arguments techniques

1. Réduction de la puissance max appelée
2. Economies d'énergie
3. Environnement intérieur plus confortable

## Littérature scientifique (TABS)

Rhee, K.-N., Olesen, B.W., Kim, K.W., 2017. Ten questions about radiant heating and cooling systems. *Building and Environment* 112, 367–381. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.030>

Romaní, J., de Gracia, A., Cabeza, L.F., 2016. Simulation and control of thermally activated building systems (TABS). *Energy and Buildings* 127, 22–42. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.057>

## 2 problématiques majeures liées à l'inertie

1. Modéliser « efficacement » le système thermique, au sens du coût en temps de calcul
2. Mettre en œuvre une technique de contrôle avancée pour tirer bénéfice de l'inertie

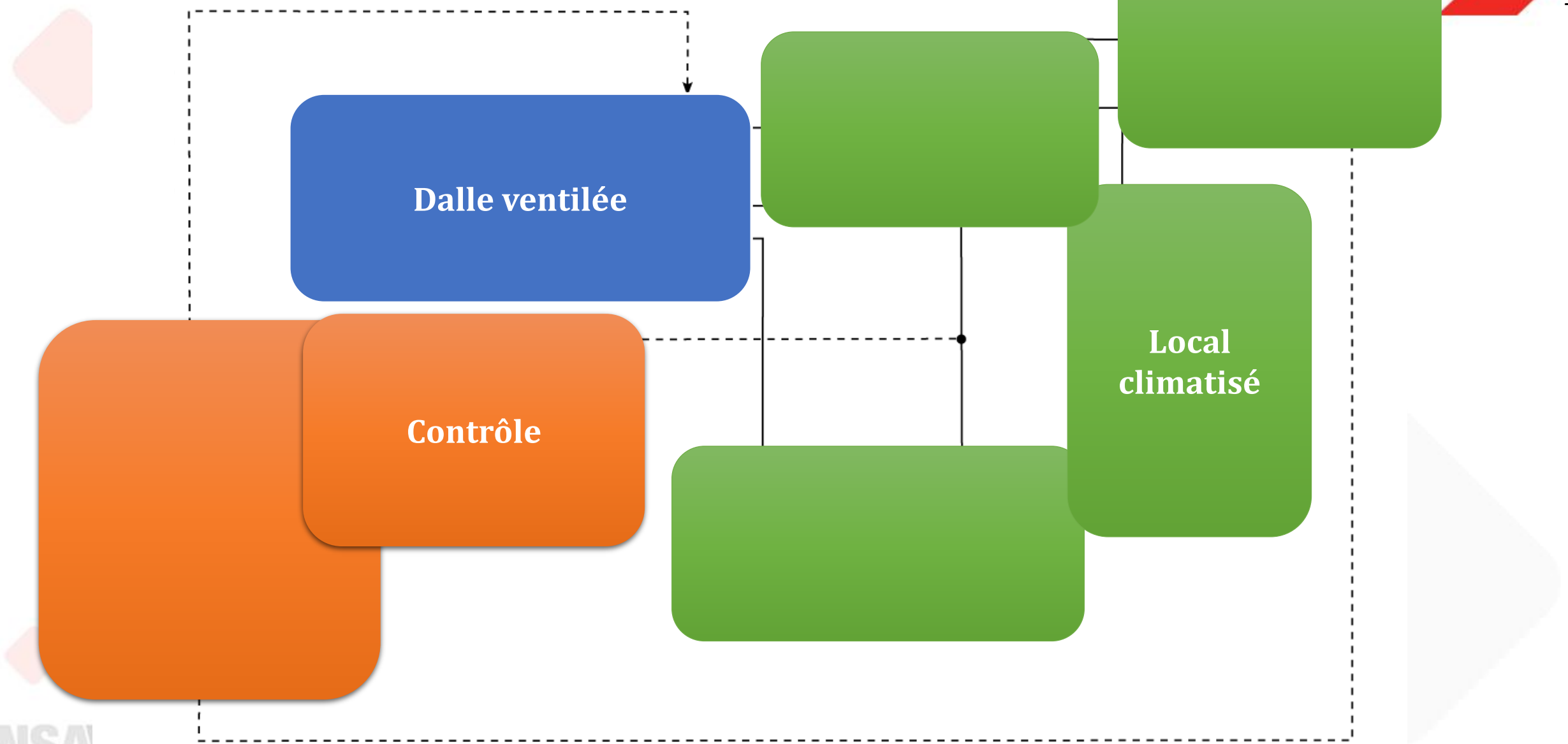


## **1. Modéliser / analyser le comportement d'une dalle ventilée**

1. Modèle fin (3D, dynamique)
2. Modèle simplifié (modèle d'état)
3. Influence de quelques paramètres

## **2. Comparer un bureau climatisé par une DV avec un cas de référence**

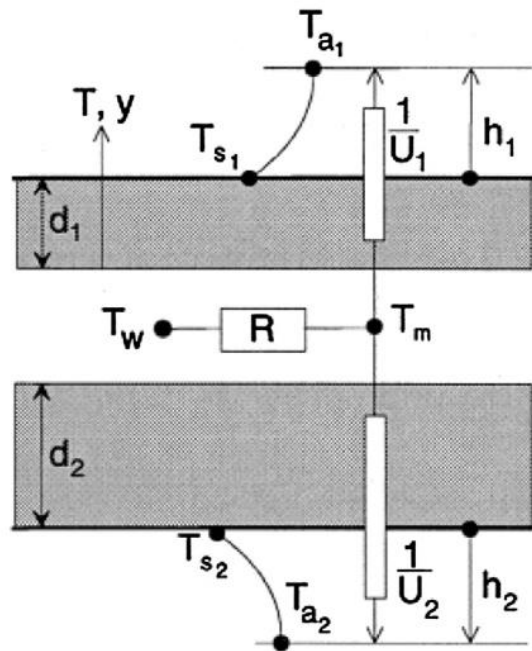
1. Définir un cas simple
2. Définir la méthode de contrôle et l'optimiser
3. Donner une comparaison relative des deux configurations





## Solution analytique en régime stationnaire

S. S. Kutateladze and V. M. Borishansky, A Concise Encyclopedia of Heat Transfer (Pergaiaon, New York, 1966)

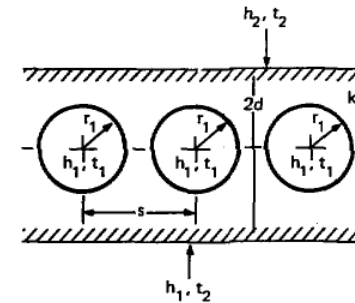


## Modèle de résistances équivalentes pour un système en eau

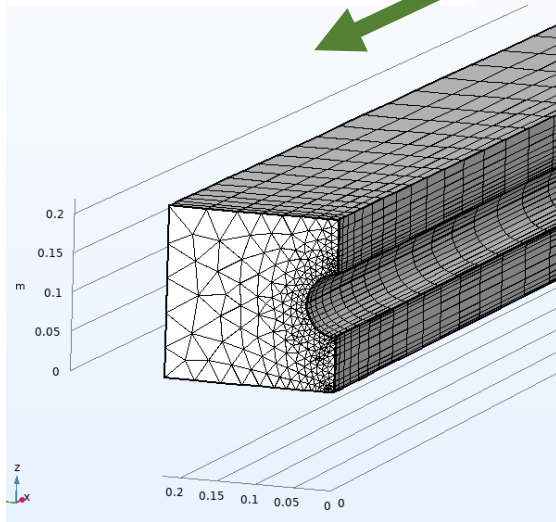
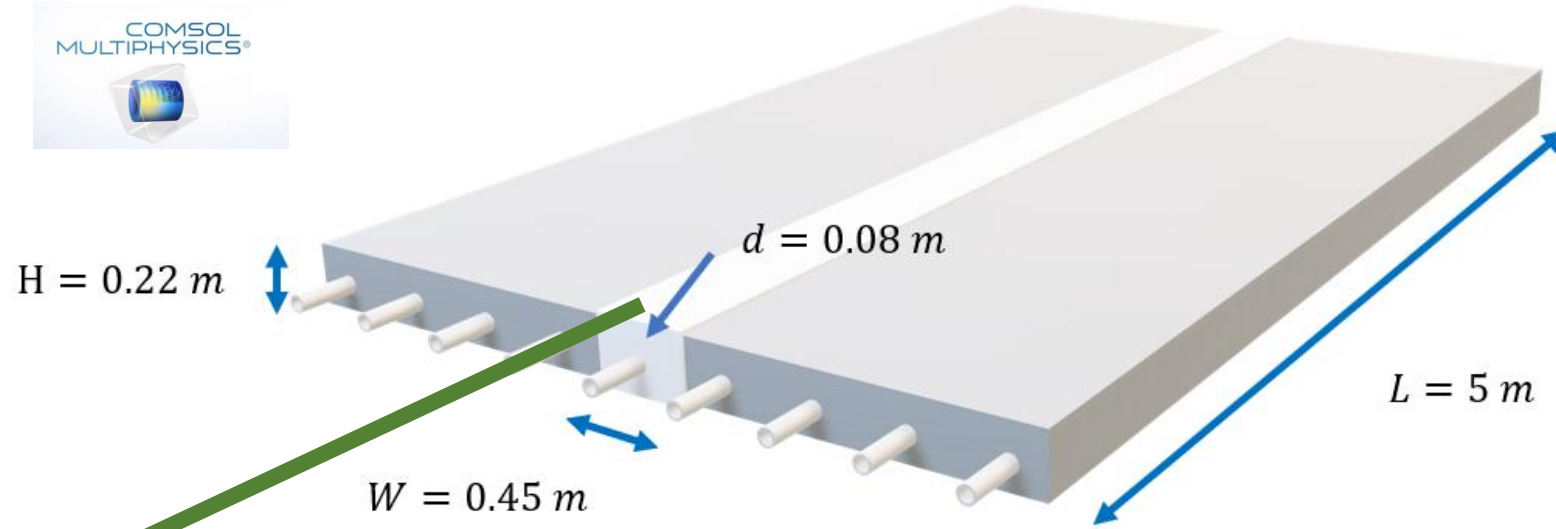
Koschenz, V. Dorer, Interaction of an air system with concrete core conditioning, Energy Build. 30 (1999) 139-145

**Pas de solution analytique en régime transitoire varié**

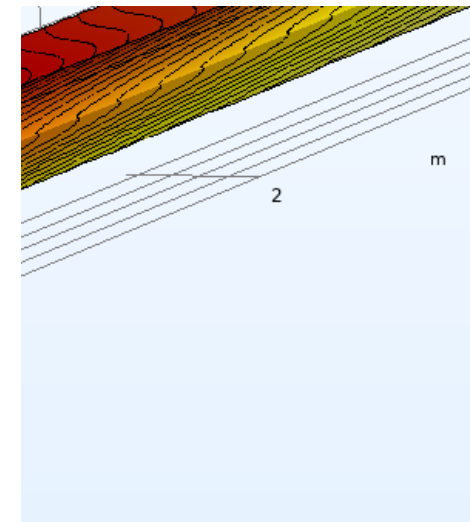
Case No.	References	Description	Solution
2.1.20	4, p. 40	Row of pipes in a wall.	$q = \frac{4\pi k(t_2 - t_1)}{\frac{1}{Bi_1} + \ln \left[ \frac{d}{\pi r_1 D} \sinh \left( 2\pi \left[ D + \frac{D}{Bi_2} \right] \right) \right]}$ , for each pipe. $Bi_1 = \frac{h_1 r_1}{k}, Bi_2 = \frac{h_2 d}{k}, D = \frac{d}{s}$



# Modélisation de la dalle ventilée



**UNACCEPTABLE**



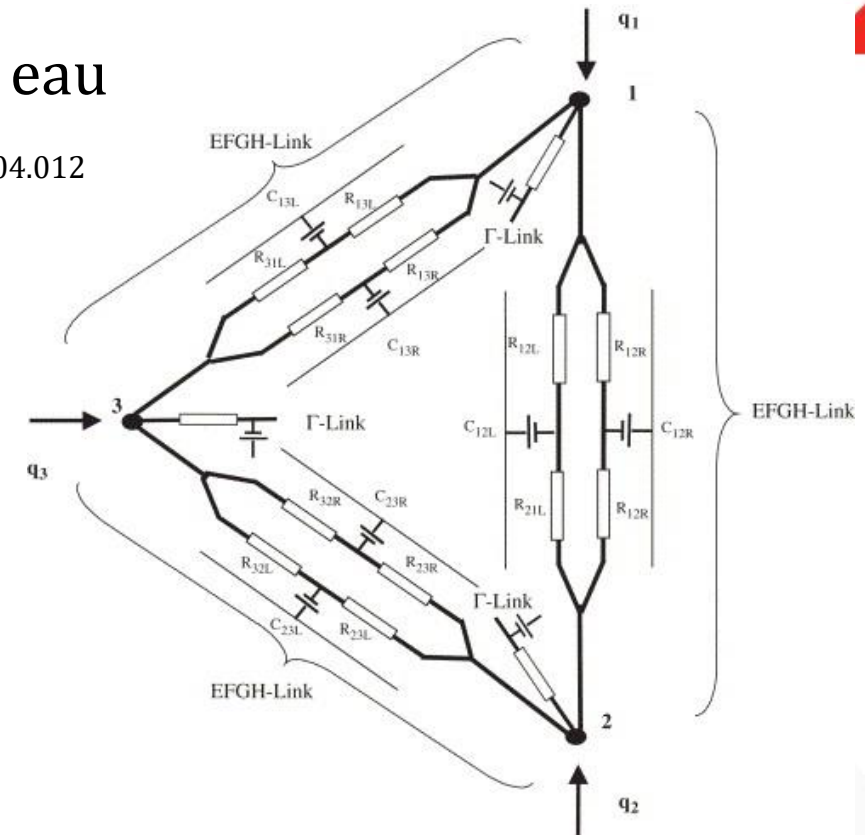
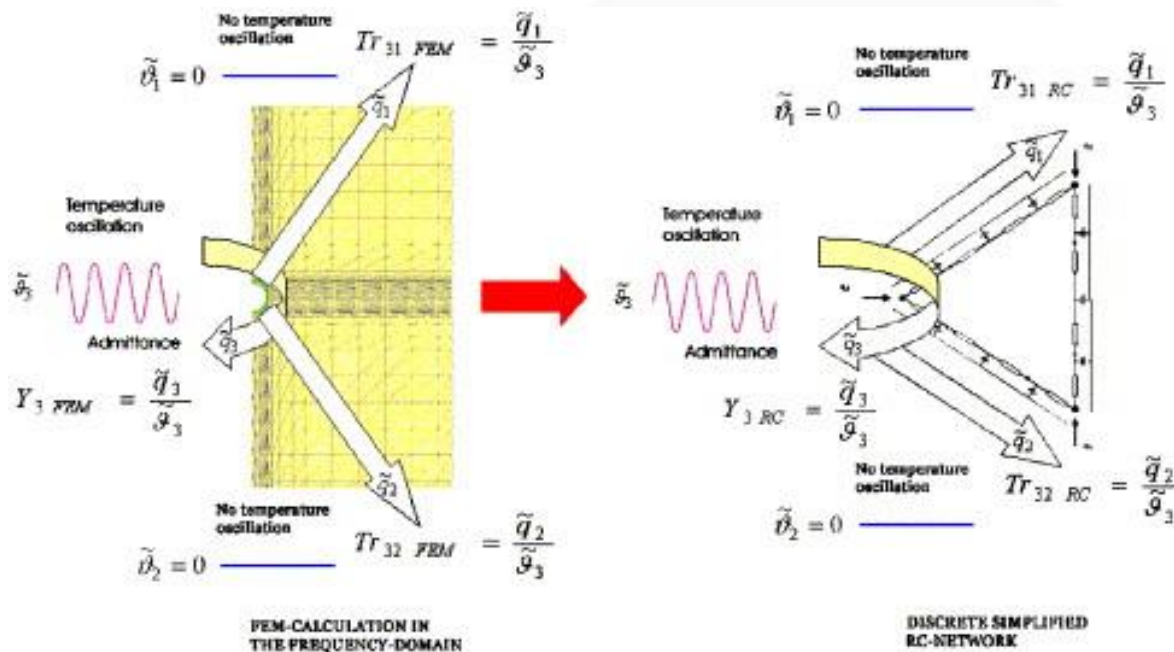
20,000 éléments  
10,000 pas de temps

30 Go et 6h de calcul  
(et sans méca flu !)



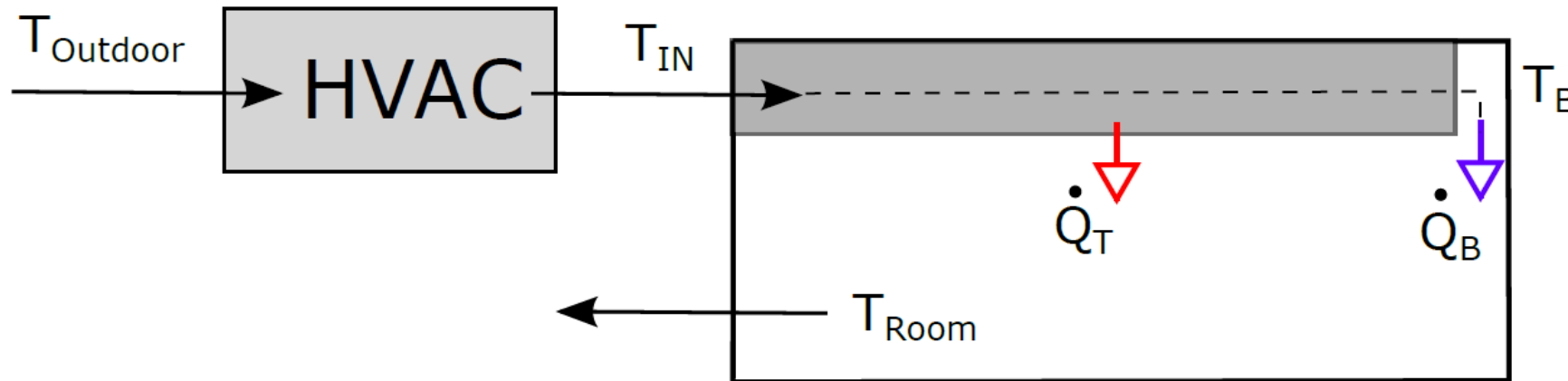
## Modèle électrique imposé pour un système en eau

Weber, T., Jóhannesson, G., 2005. An optimized RC-network for thermally activated building components. Building and Environment 40, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.04.012>



Les transmittances doivent être identifiées à partir de modélisations fines (type COMSOL)

Penser la dalle ventilée comme un *système* qui participe aux bilan thermique du local climatisé



DV soumise à 2 conditions limites

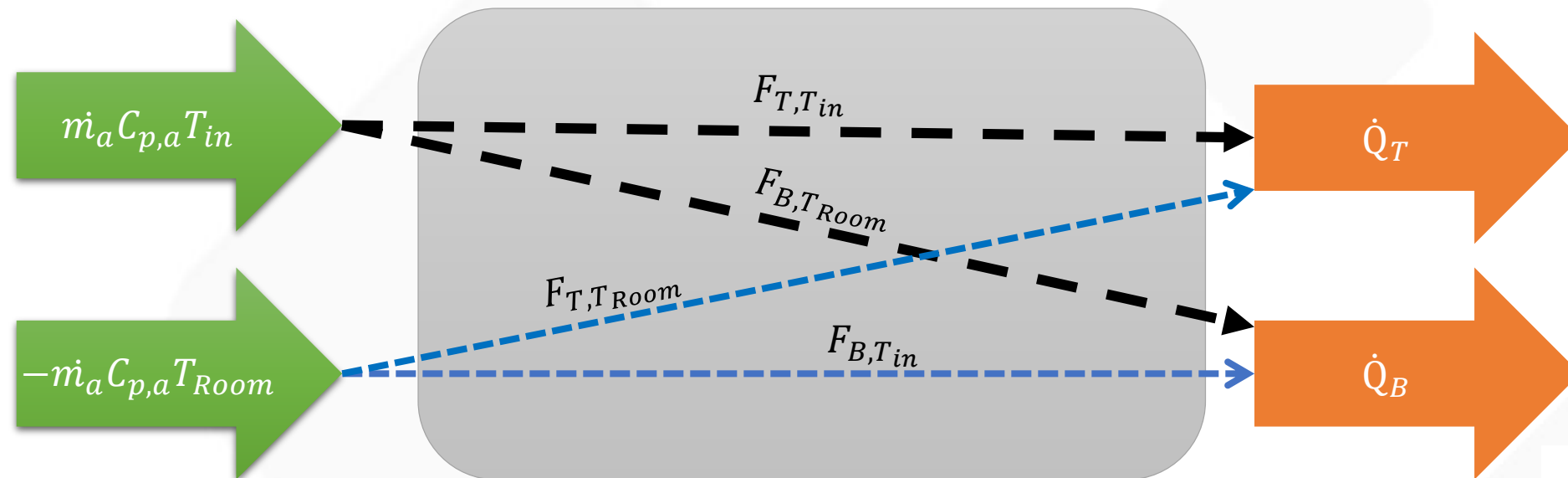
- Débit d'air soufflé à  $T_{in}$
- Exposée au local à  $T_{room}$
- *Pont thermique négligé*
- *Adiabatique sur la face supérieure*

DV émet de la chaleur de 2 façons

- $\dot{Q}_T$ , par conduction à travers la dalle, puis par rayonnement / convection dans le local
- $\dot{Q}_B$ , via le débit d'air soufflé dans le local, à une température  $T_B \neq T_{in}$  en entrée de dalle
- $T > T_{rosée}$  en tout point  $\rightarrow$  bilan sensible uniquement

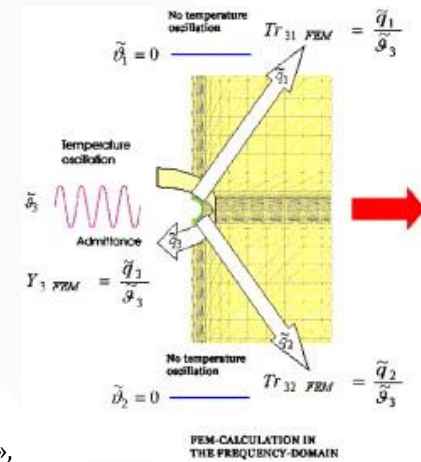


## Définition des fonctions de transfert entre les entrées et les sorties



$$\dot{Q}_T = \dot{m}_a C_{p,a} (F_{T,T_{in}} T_{in} - F_{T,T_{Room}} T_{Room})$$

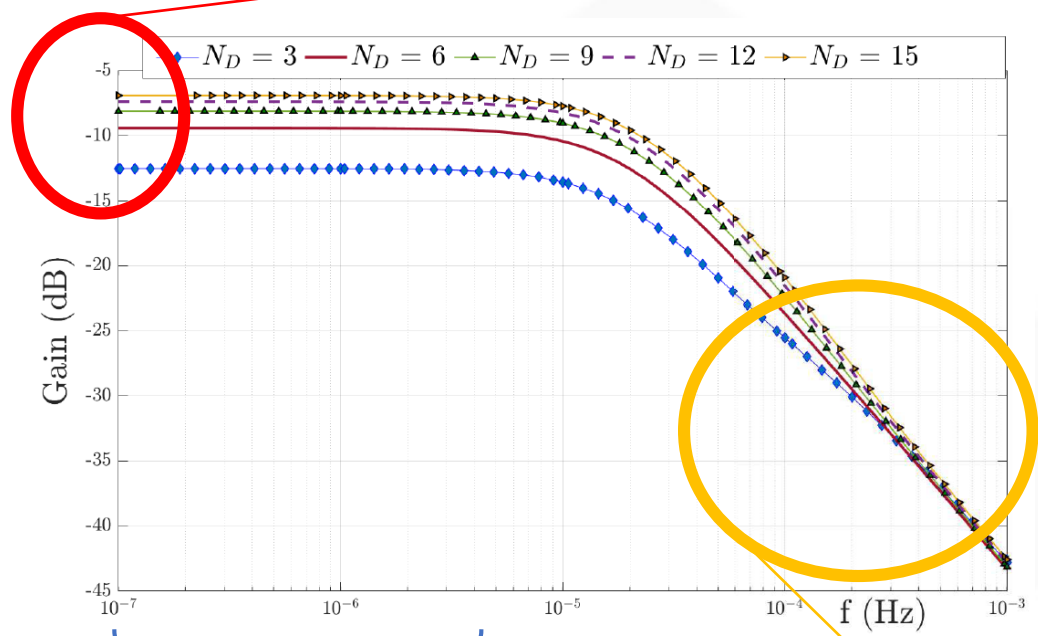
$$\dot{Q}_B = \dot{m}_a C_{p,a} (F_{B,T_{in}} T_{in} - F_{B,T_{Room}} T_{Room})$$



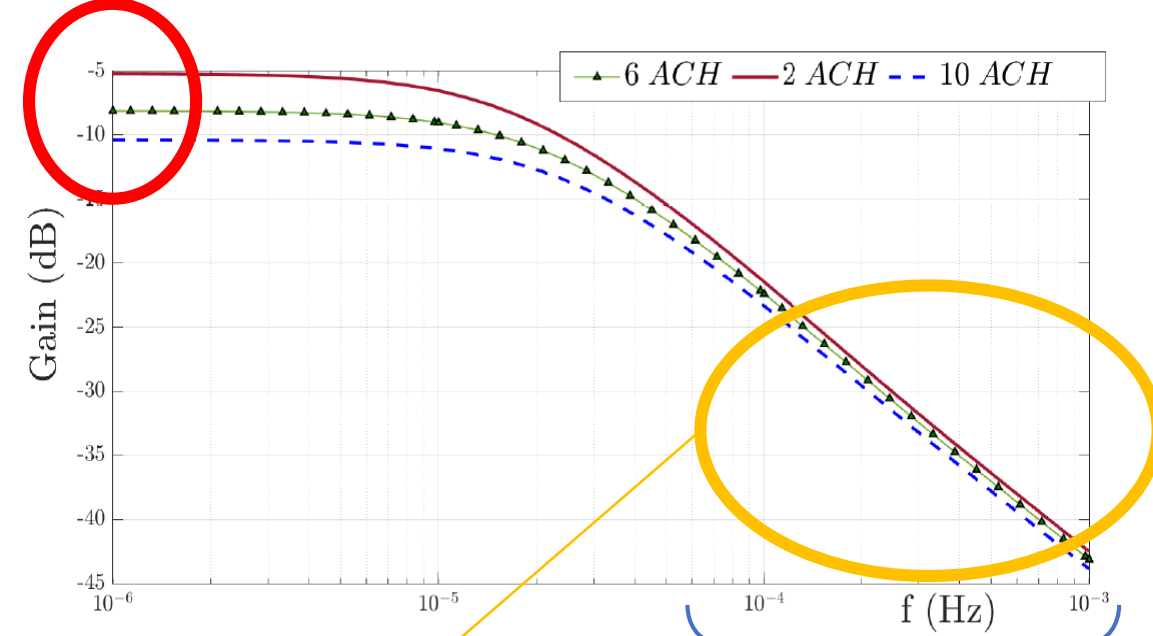
# Diagramme de Bode de $F_{T,T_{in}}$

Davantage de flux transmis pour un nombre élevé de gaines et à bas débit d'air

Gain	As / Ae
0	1
-1	0,89
-2	0,79
-3	0,71
-4	0,63
-5	<b>0,56</b>
-6	0,50
-7	0,45
-8	0,40
-9	0,35
-10	<b>0,32</b>
-11	0,28
-12	0,25
-13	0,22
-14	0,20
-15	0,18
-16	0,16
-17	0,14
-18	0,13
-19	0,11
-20	0,10



Basse fréquence  
(100 j)  
~  
Régime permanent



Dans tous les cas, les variations rapides en entrée de dalle n'ont pas d'effet sur le flux transmis

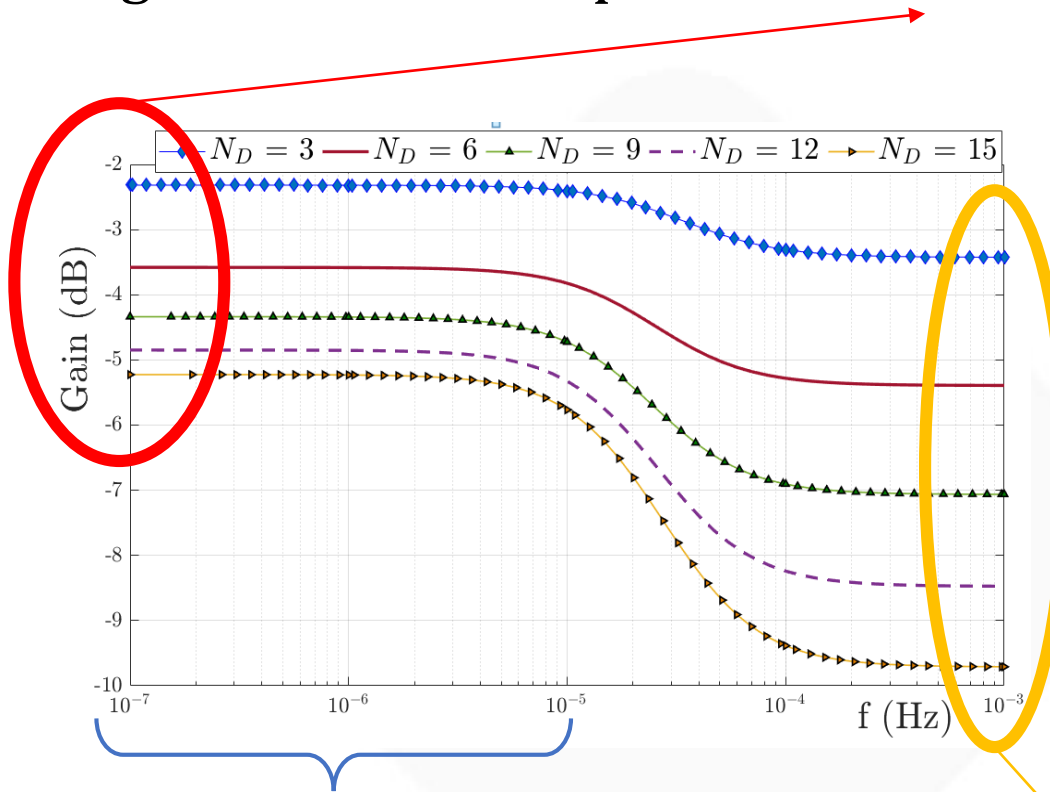
Haute fréquence  
(20 min)  
~  
Oscillations rapides de la température en entrée de dalle



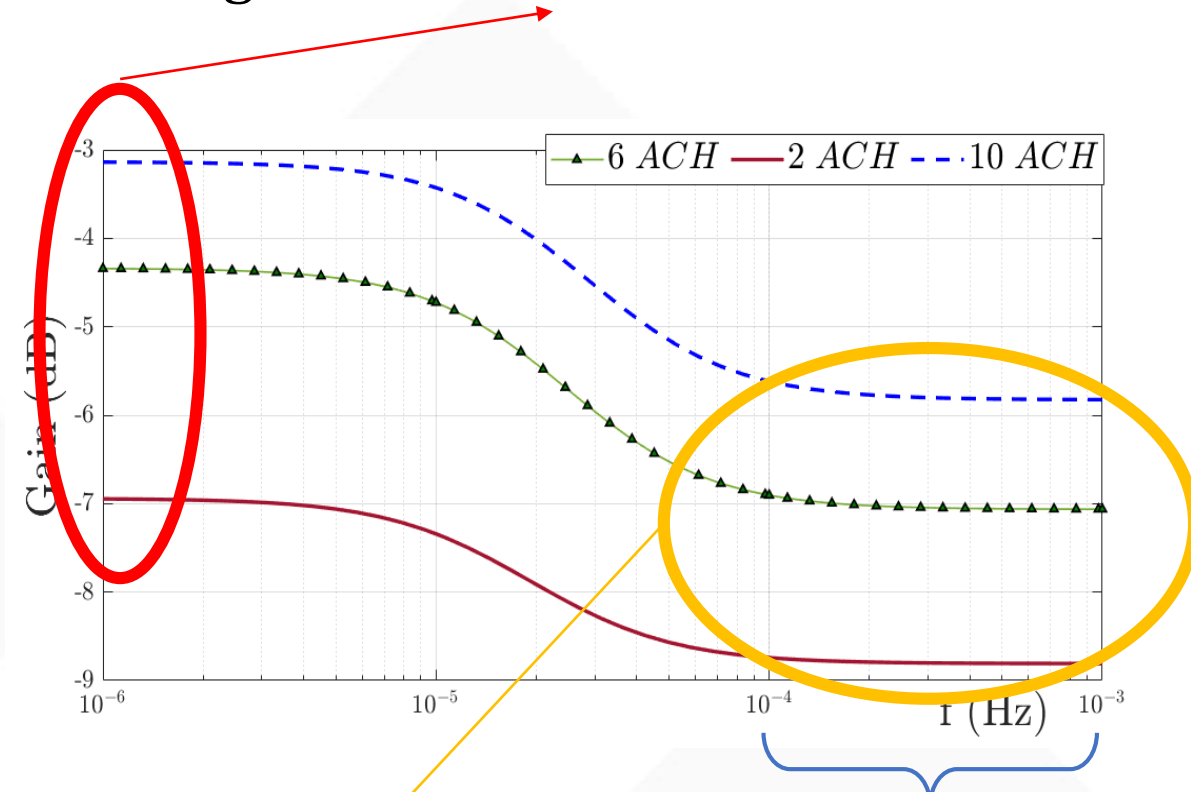
# Diagramme de Bode de $F_{B,T_{in}}$

Davantage de flux soufflé pour un faible nombre de gaines et à haut débit d'air

Gain	As / Ae
0	1
-1	0,89
-2	0,79
-3	0,71
-4	0,63
-5	<b>0,56</b>
-6	0,50
-7	0,45
-8	0,40
-9	0,35
-10	<b>0,32</b>
-11	0,28
-12	0,25
-13	0,22
-14	0,20
-15	0,18
-16	0,16
-17	0,14
-18	0,13
-19	0,11
-20	<b>0,10</b>

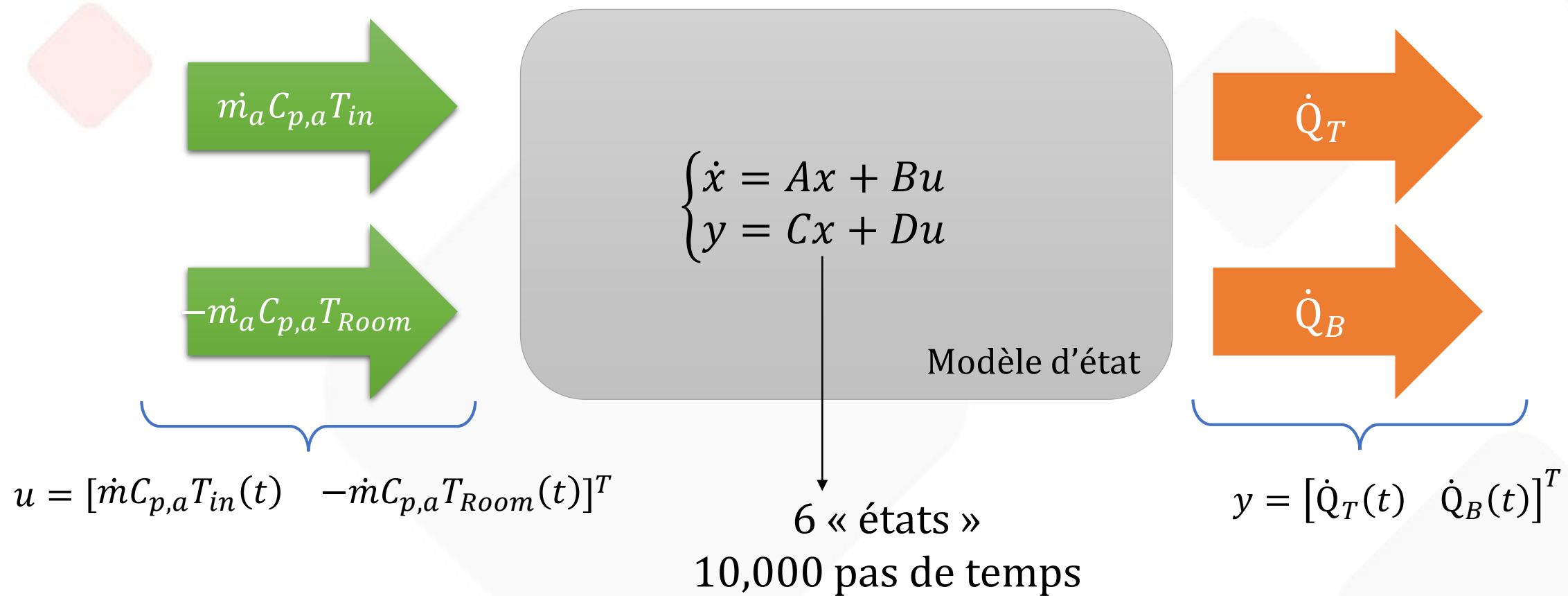


> 27h45



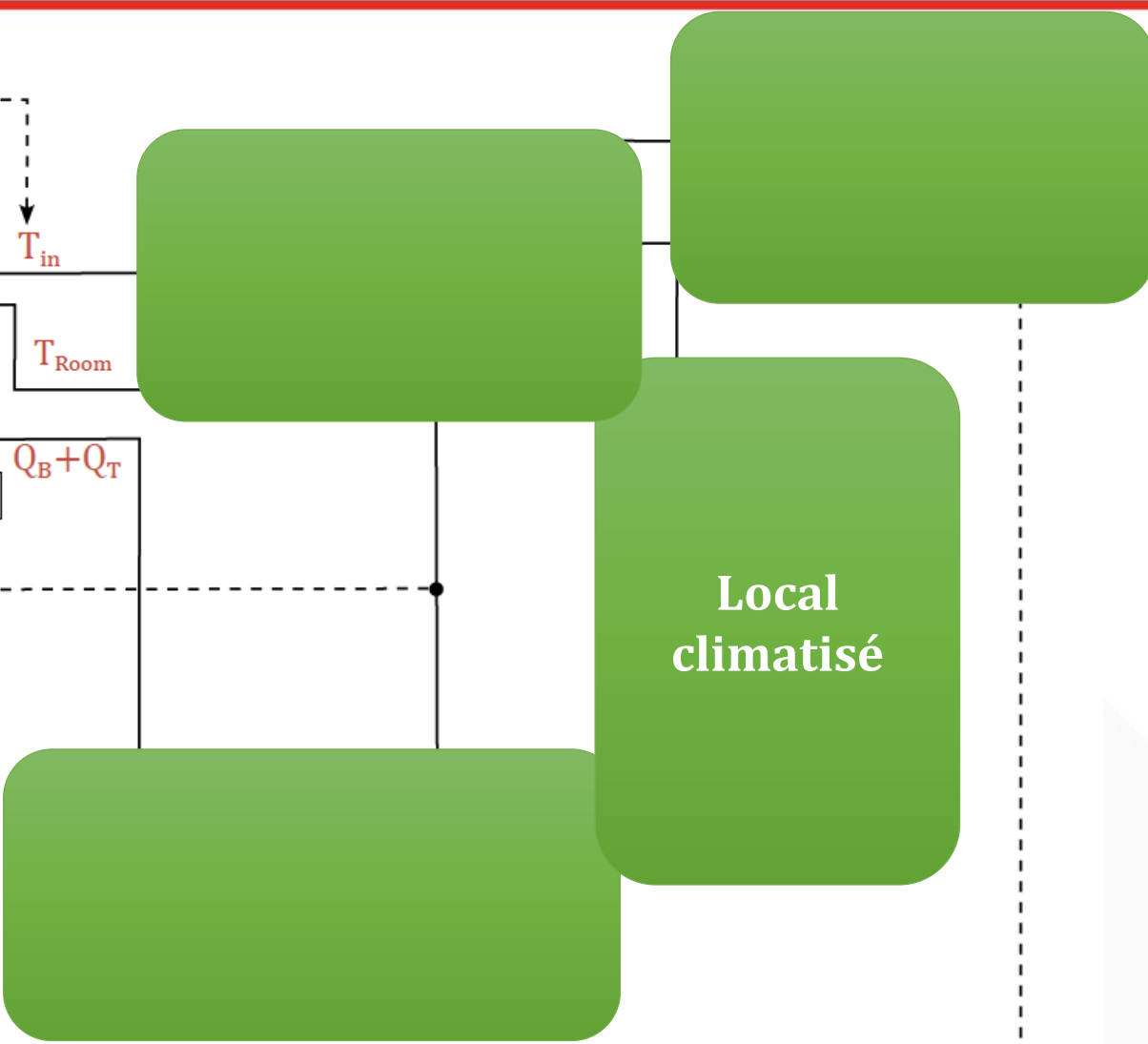
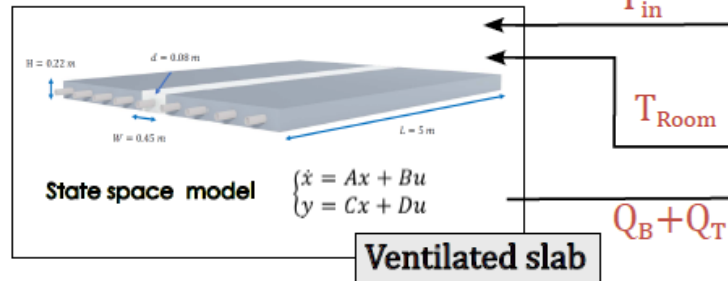
< 2h45

Les variations rapides en entrée de dalle sont atténuées au point de soufflage  
Impact plus marqué à grand nombre de gaines



4 Mo de résultats, 1s de temps de calcul\*  
Erreur de 0,03 W en moyenne,  $\pm 10\%$  max en instantané

\*c'est mieux



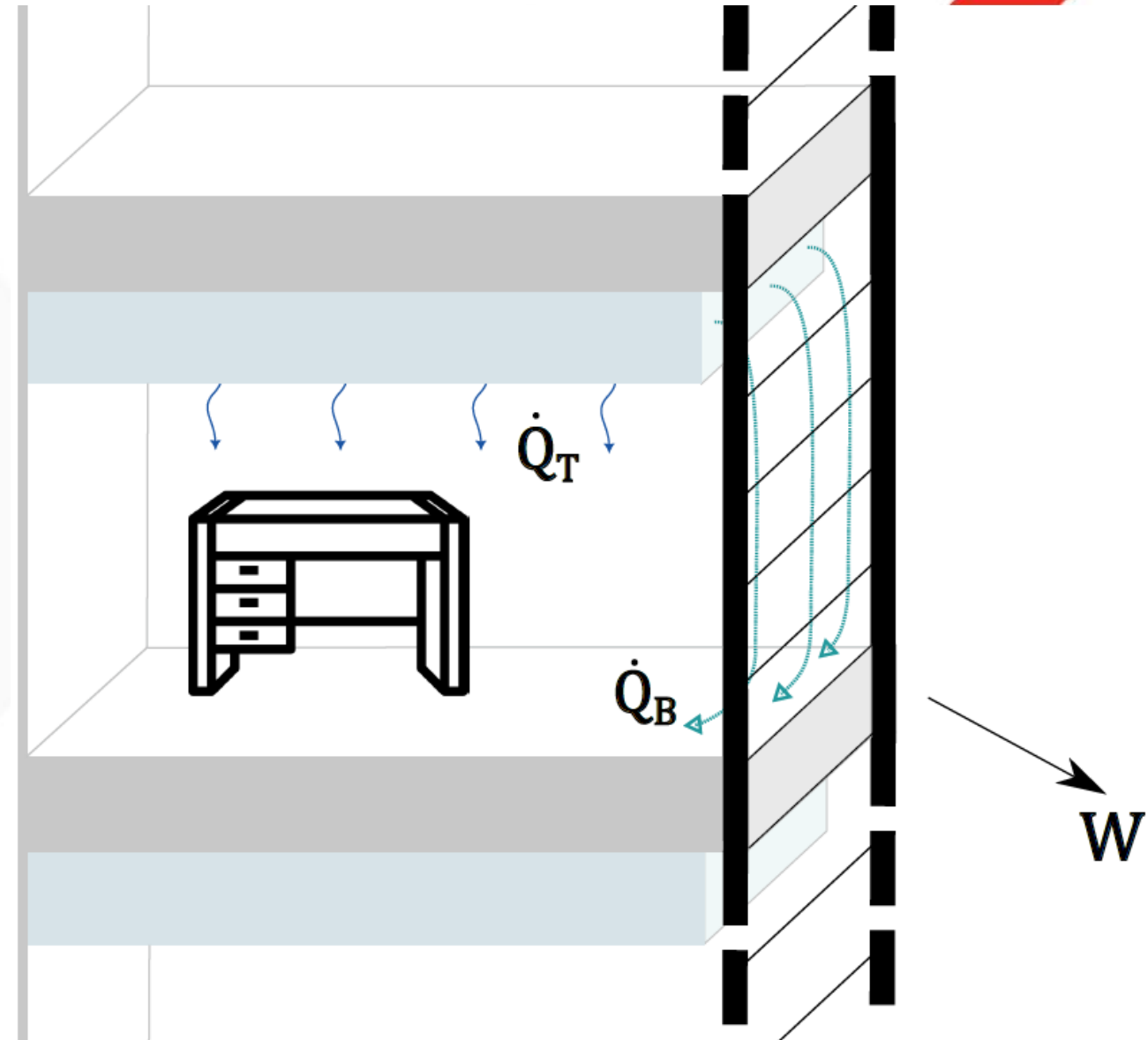
Contrôle

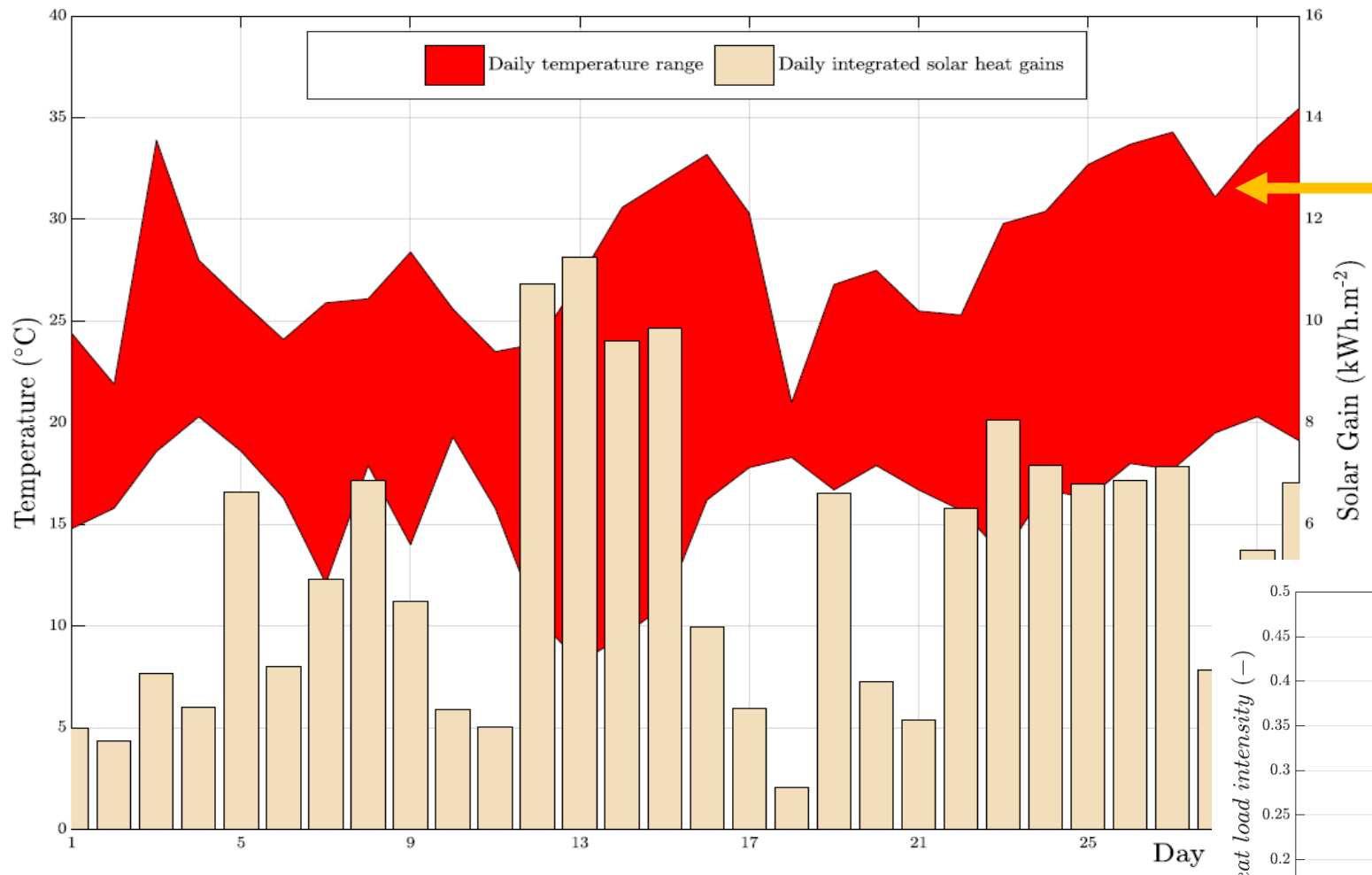
Local climatisé



## Points clés

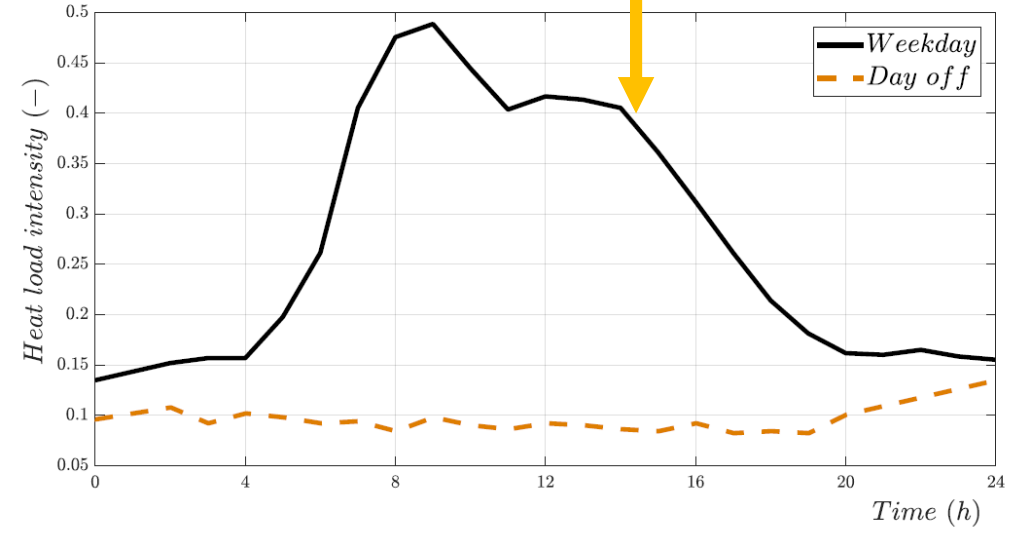
1. Bureau pour 2 personnes ( $\sim 20 \text{ m}^2$ )
2. Une façade vitrée orientée Ouest ( $\sim 10 \text{ m}^2$ )
3. Etage intermédiaire
4. Prise en compte de l'inertie intérieure ( $40 \text{ kg/m}^2$  mobilier)
5. Sources internes  $24 \text{ W/m}^2$





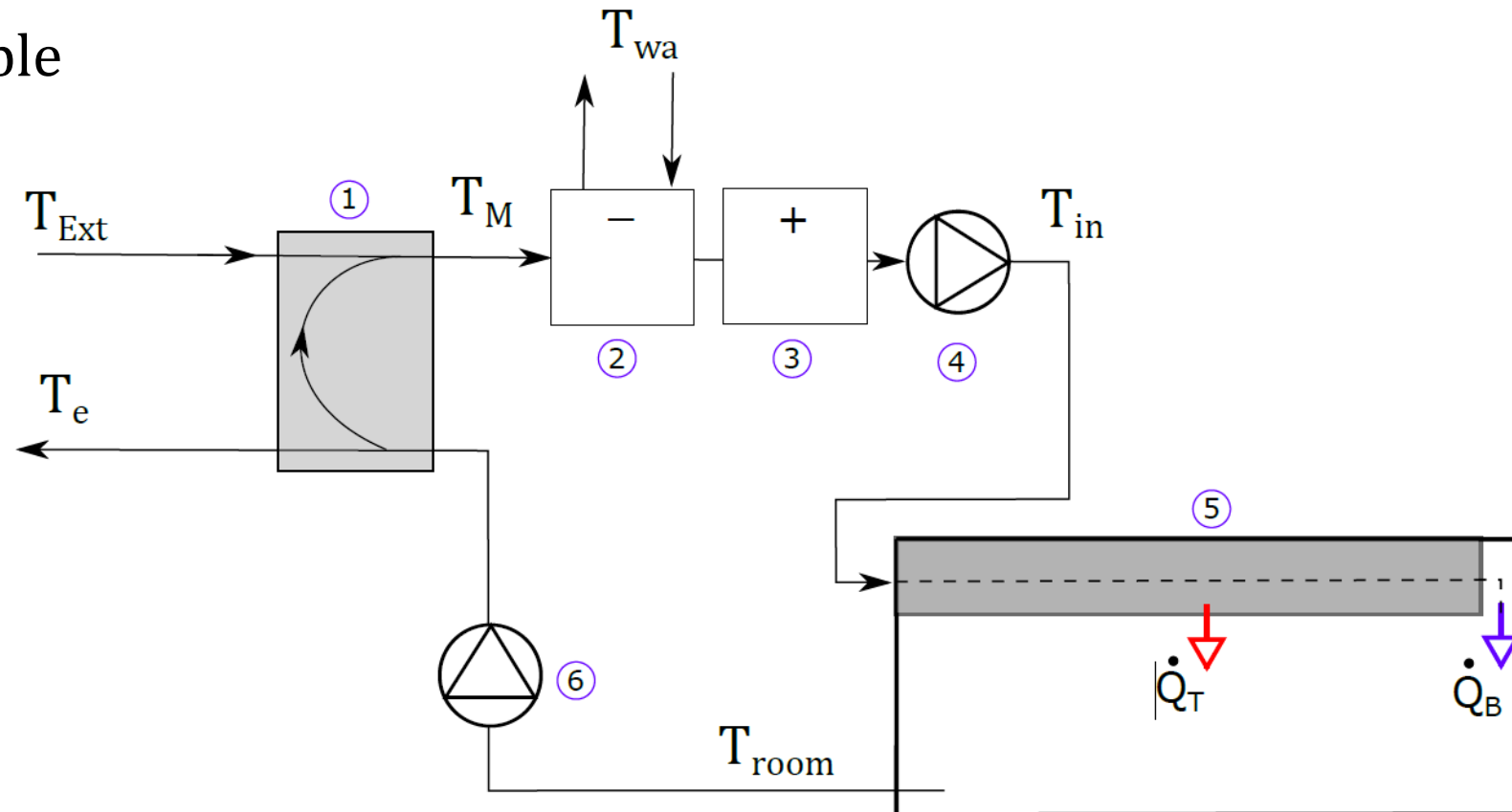
Conditions estivales  
(30 j ~ Montpellier)

Scénario intérieur



## Points clés

1. Système idéal – sans limite de puissance et à réponse instantanée
2. BF à eau glacée modulée en température
3. Recyclage d'air programmable
4. Pas d'humidification
5. Débit soufflé constant



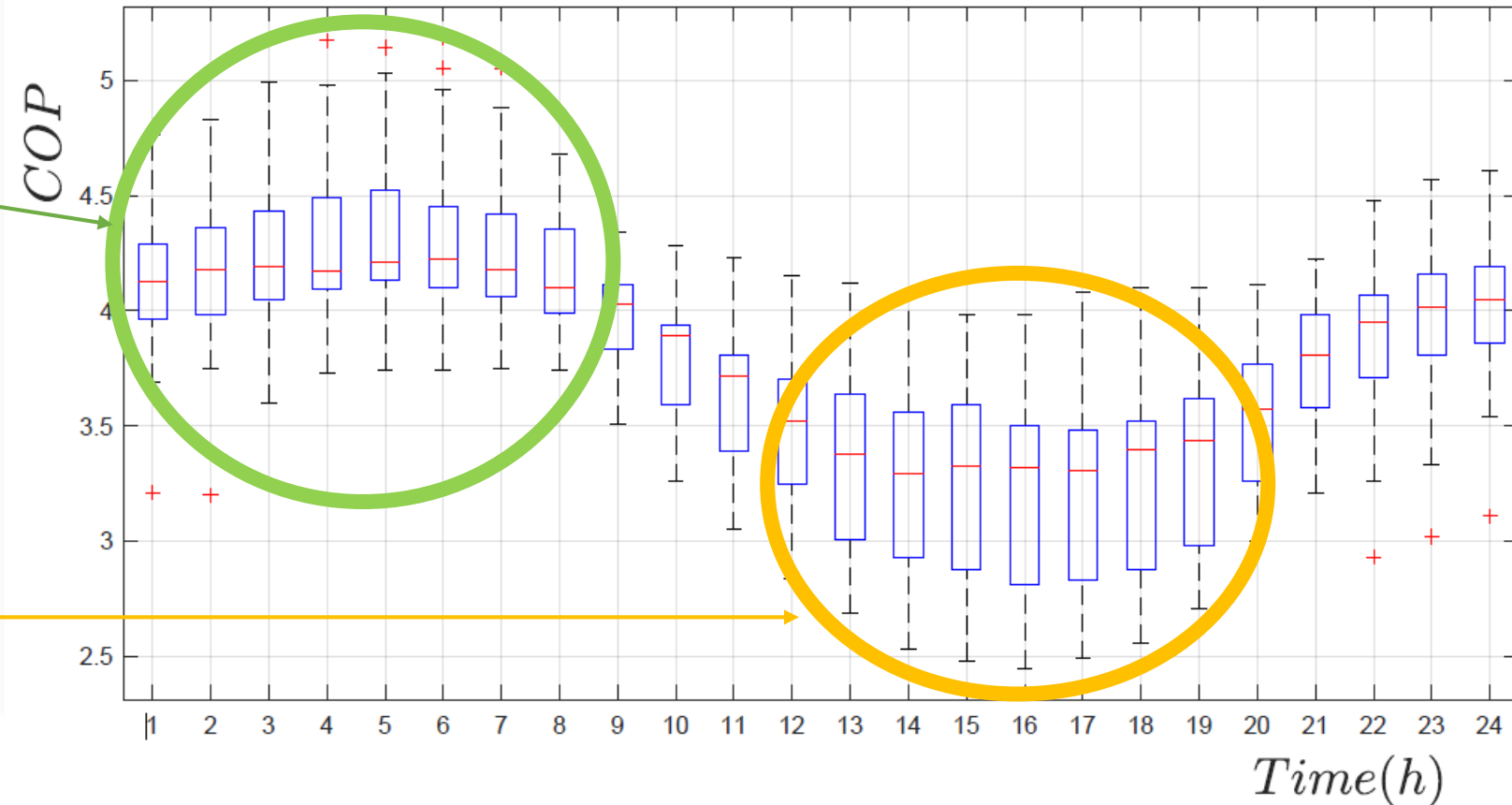


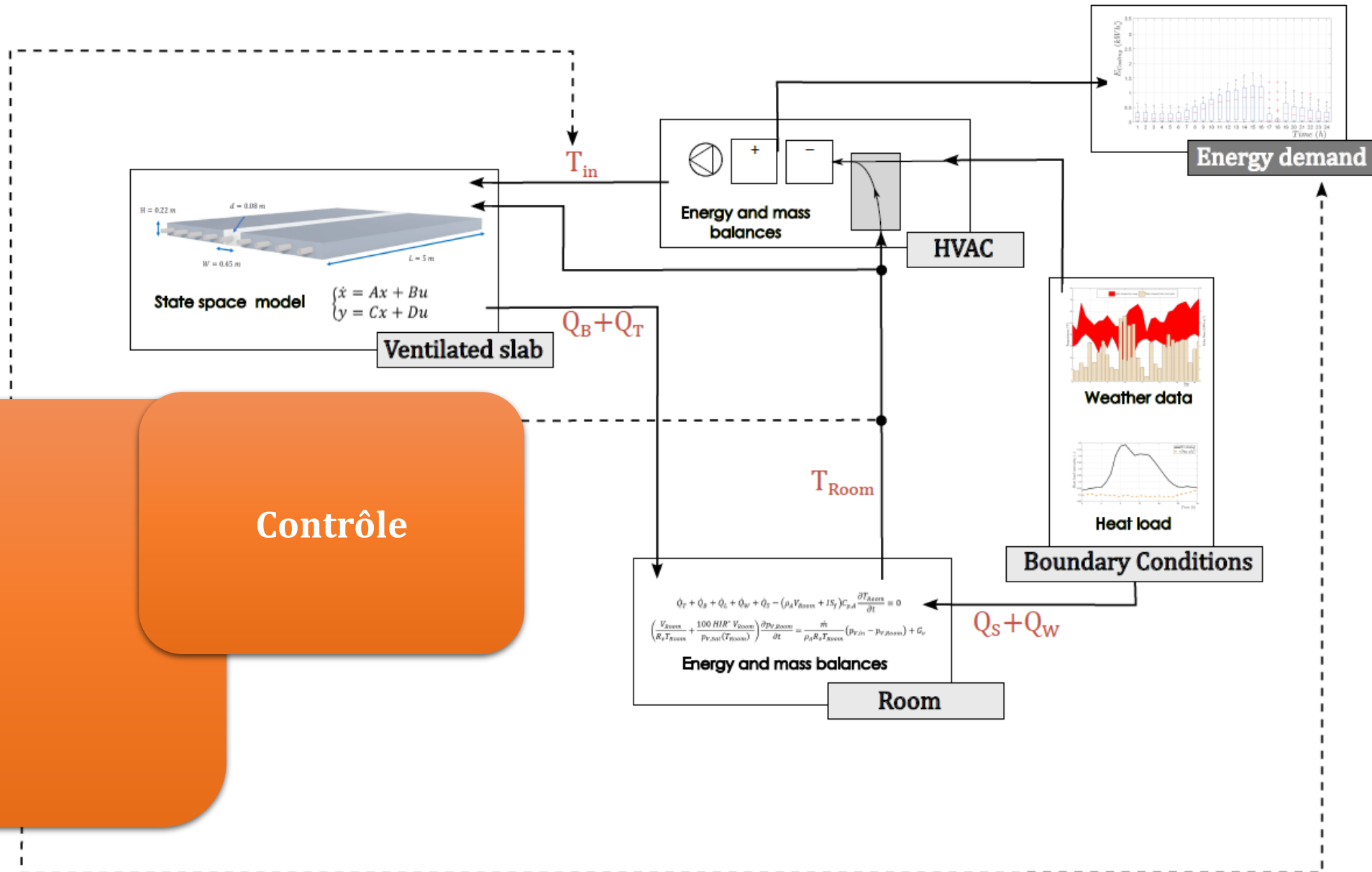
## Economies d'énergie par stockage de froid

Eau glacée produite par PAC eau/air,  $COP = f(T_{ext})$

1. Production de froid la nuit
2. Stockage dans la dalle
3. Emission dans la journée

Faible production en journée

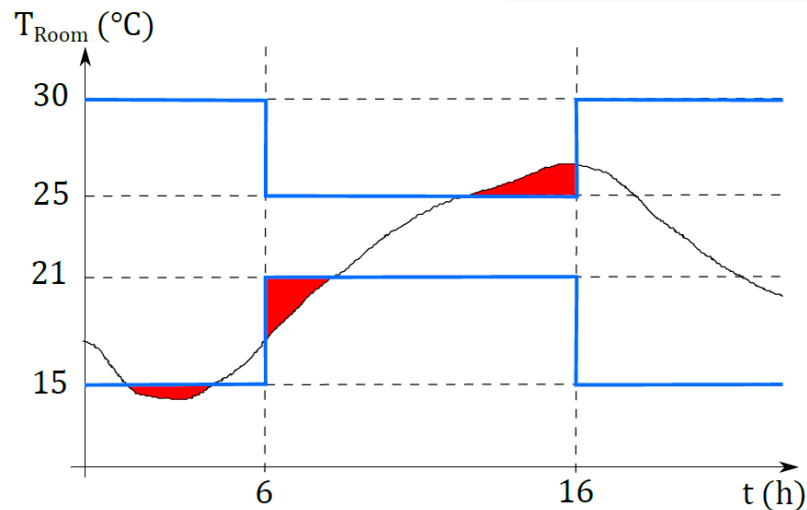




**Contrôle**

## Contraintes

- Limite basse de température en entrée de dalle ( $> 10\text{ °C}$ )
- Maintenir la température intérieure dans un intervalle donné



$$\theta = \int_0^t \max(T_{Room}(t) - T_{Up}(t); 0) + \max(T_{Low}(t) - T_{Room}(t); 0) dt$$

## Objectif

Minimiser la demande énergétique  $E$  dans les batteries chaudes et froides

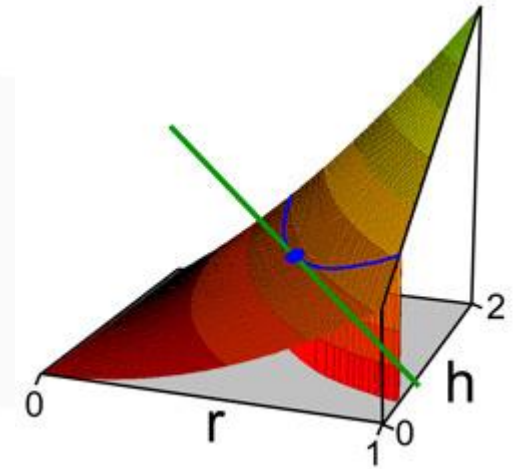
$$f = \alpha_E E + \alpha_\theta \theta$$



## Méthodes analytiques

Multiplicateur de Lagrange

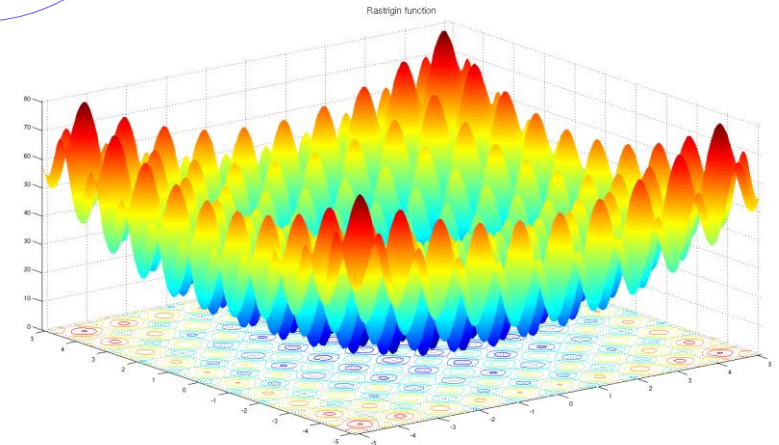
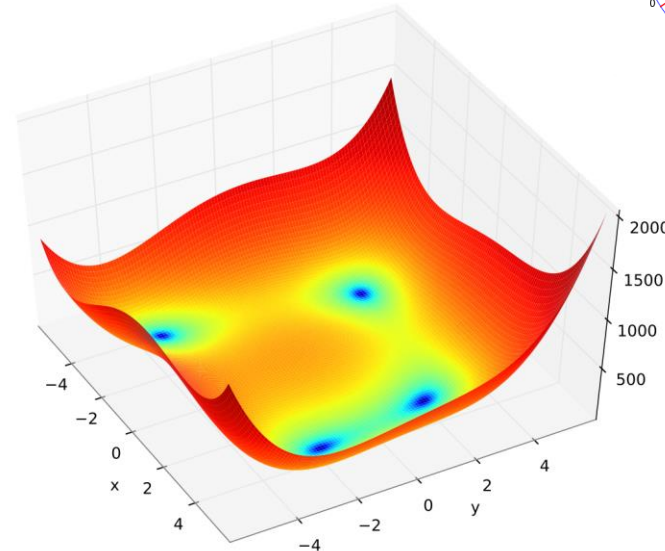
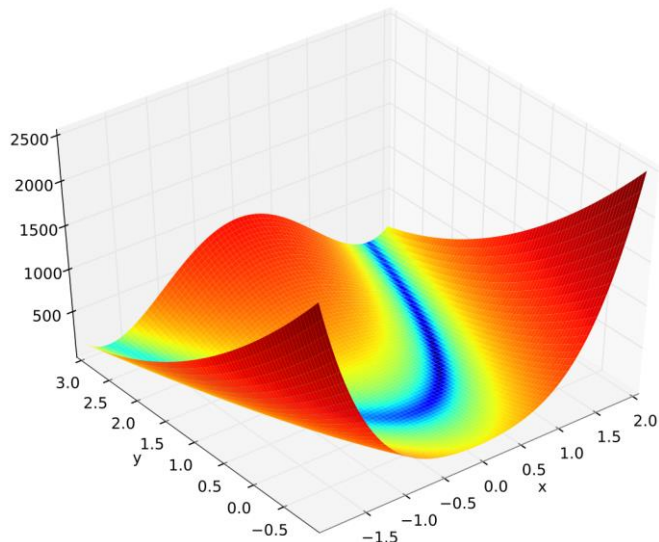
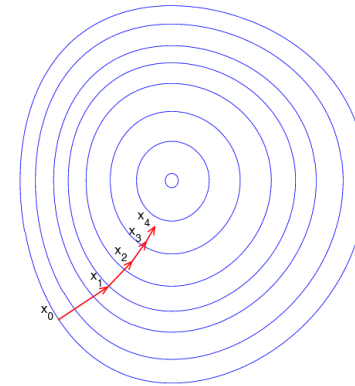
Ex : cylindre de surface minimale pour un volume donné



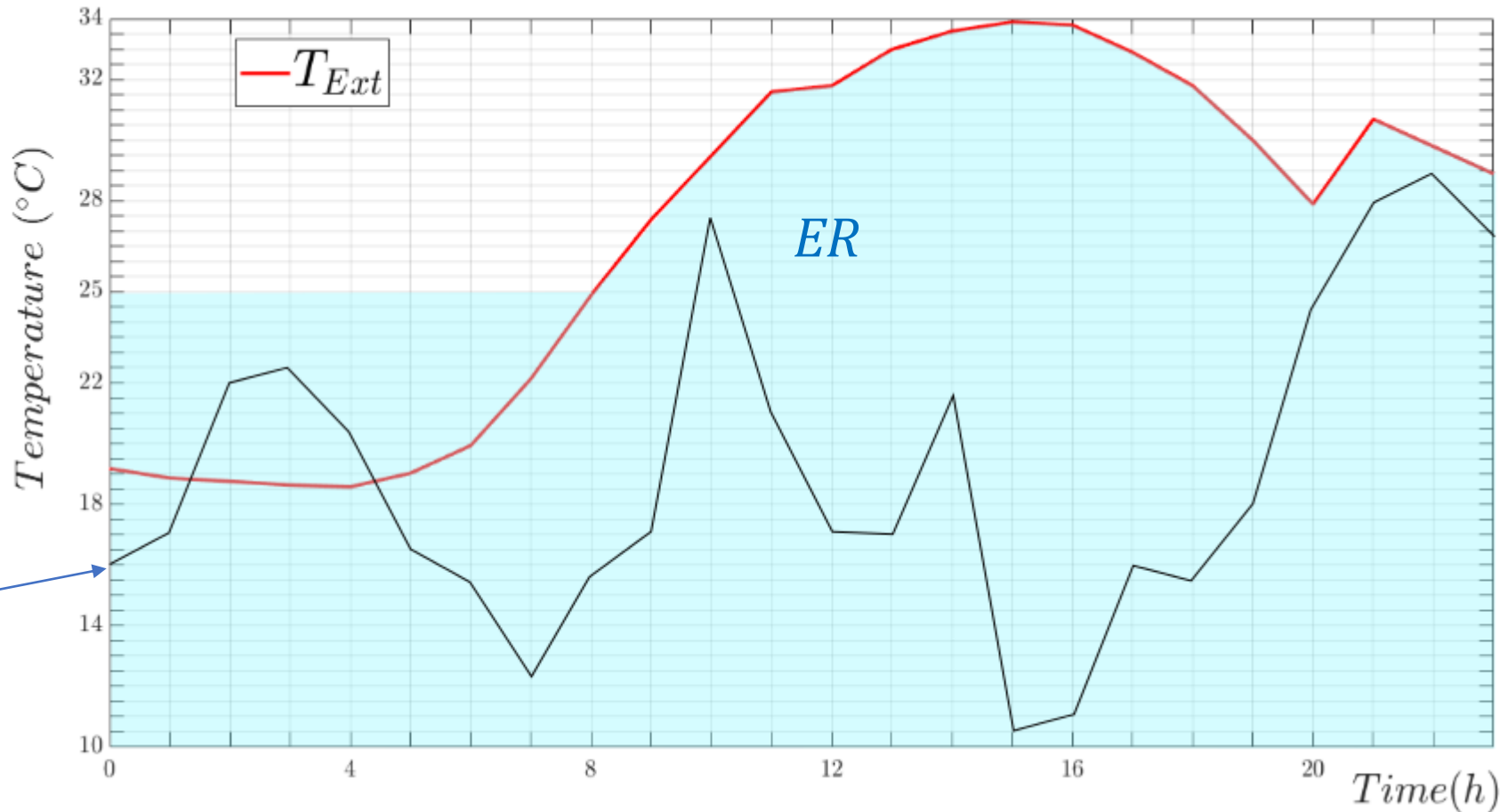
## Méthodes numériques

Algorithme du gradient

Méthodes évolutionnistes



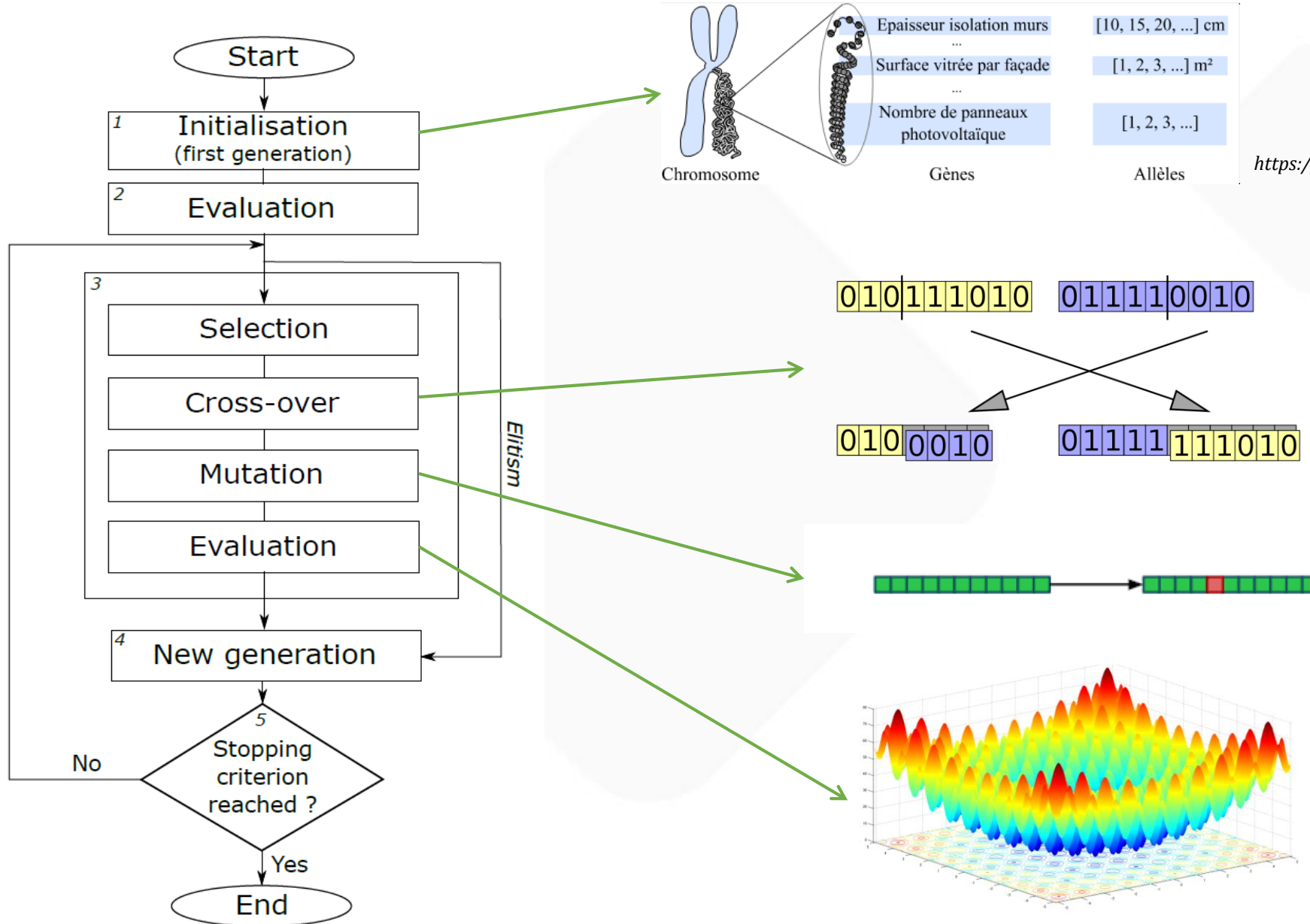
Pas horaire,  $T_{in}$  varie par pas de  $0,5^{\circ}\text{C}$  sur  $[10 : \max(25 ; T_{ext}(t))]^{\circ}\text{C}$



Trajectoire

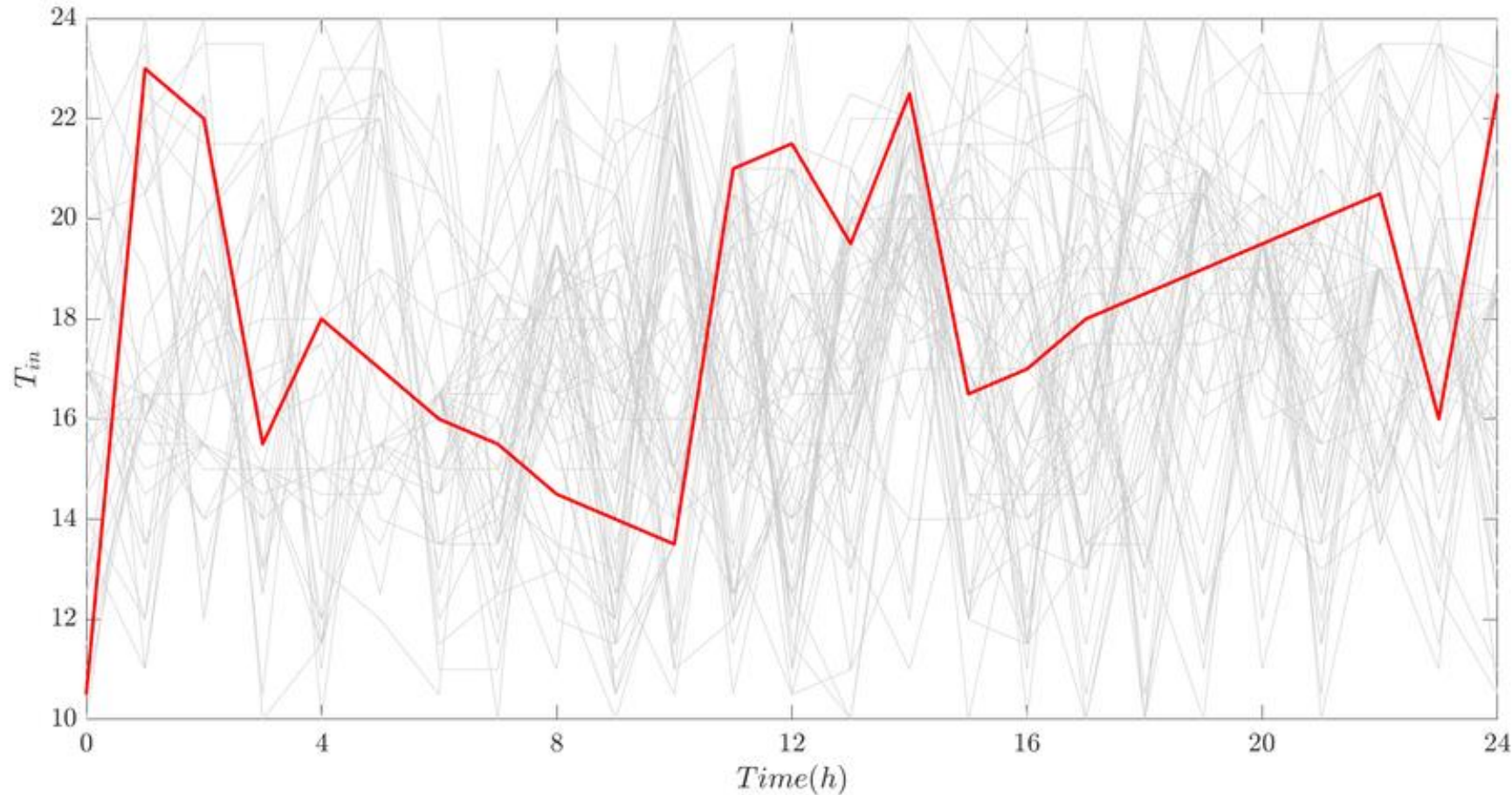
Nombre de trajectoires possible dans cet exemple  $\sim 4 \cdot 10^{30}$

# Algorithme génétique

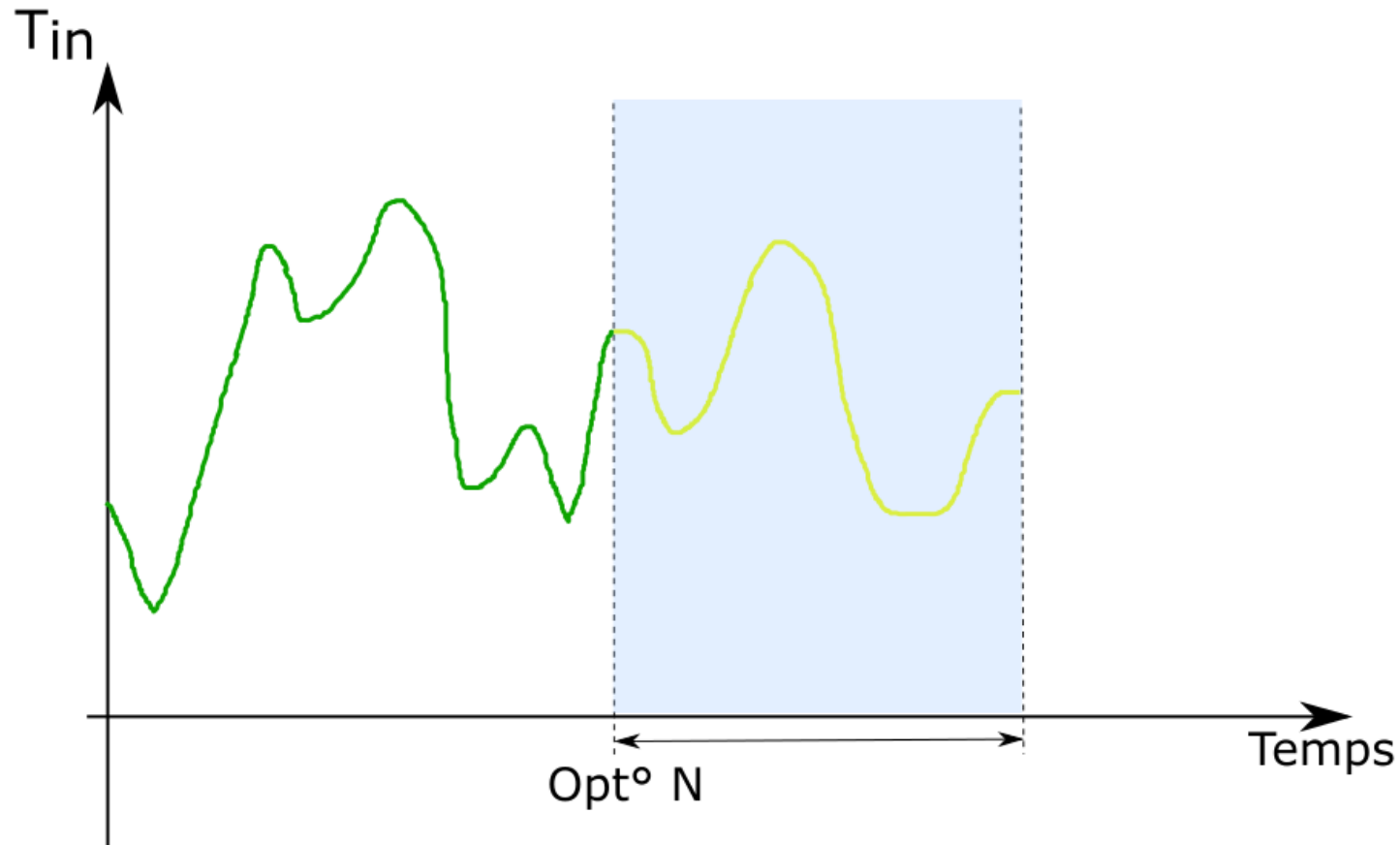




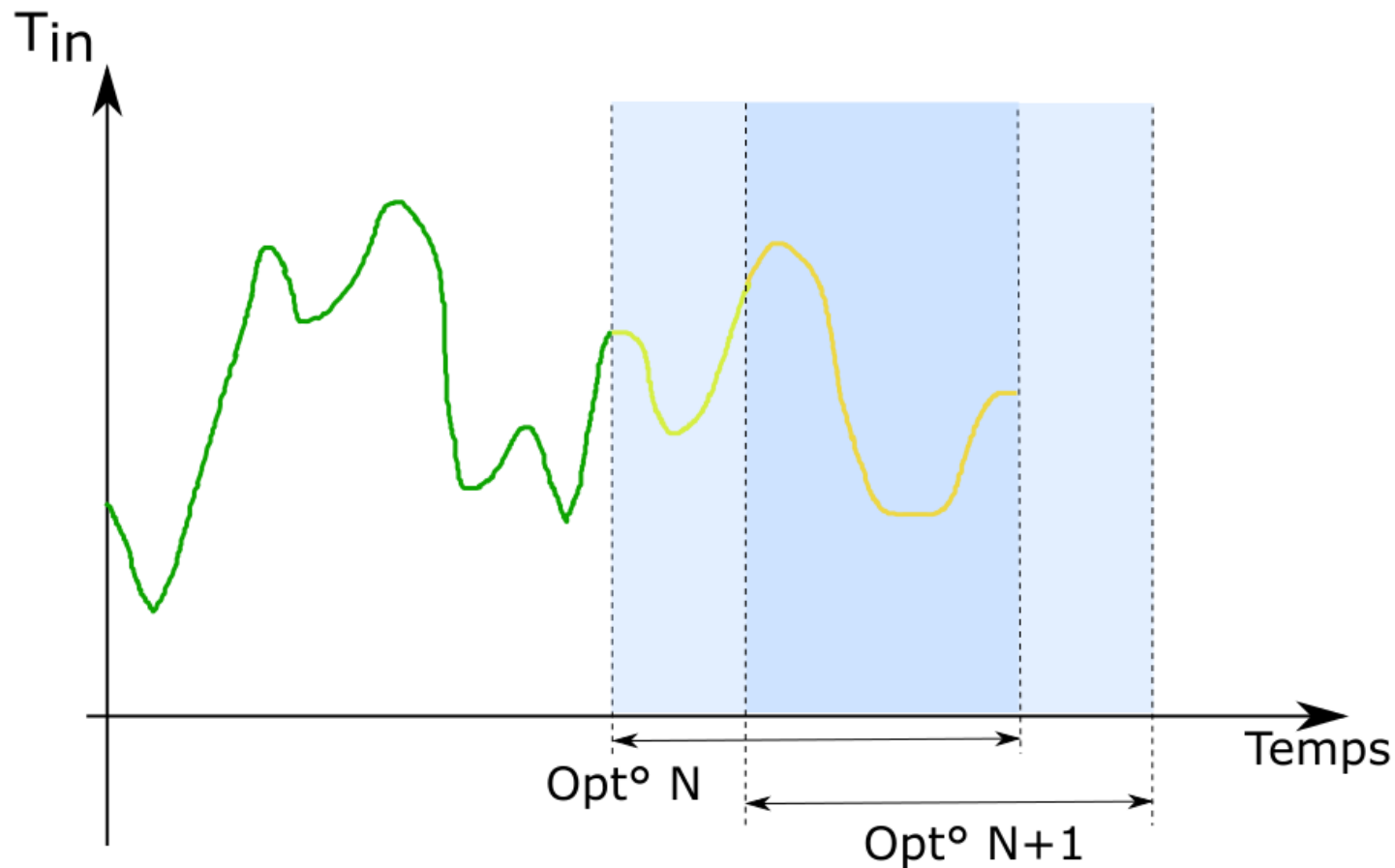
## Evolution de la population pendant l'optimisation



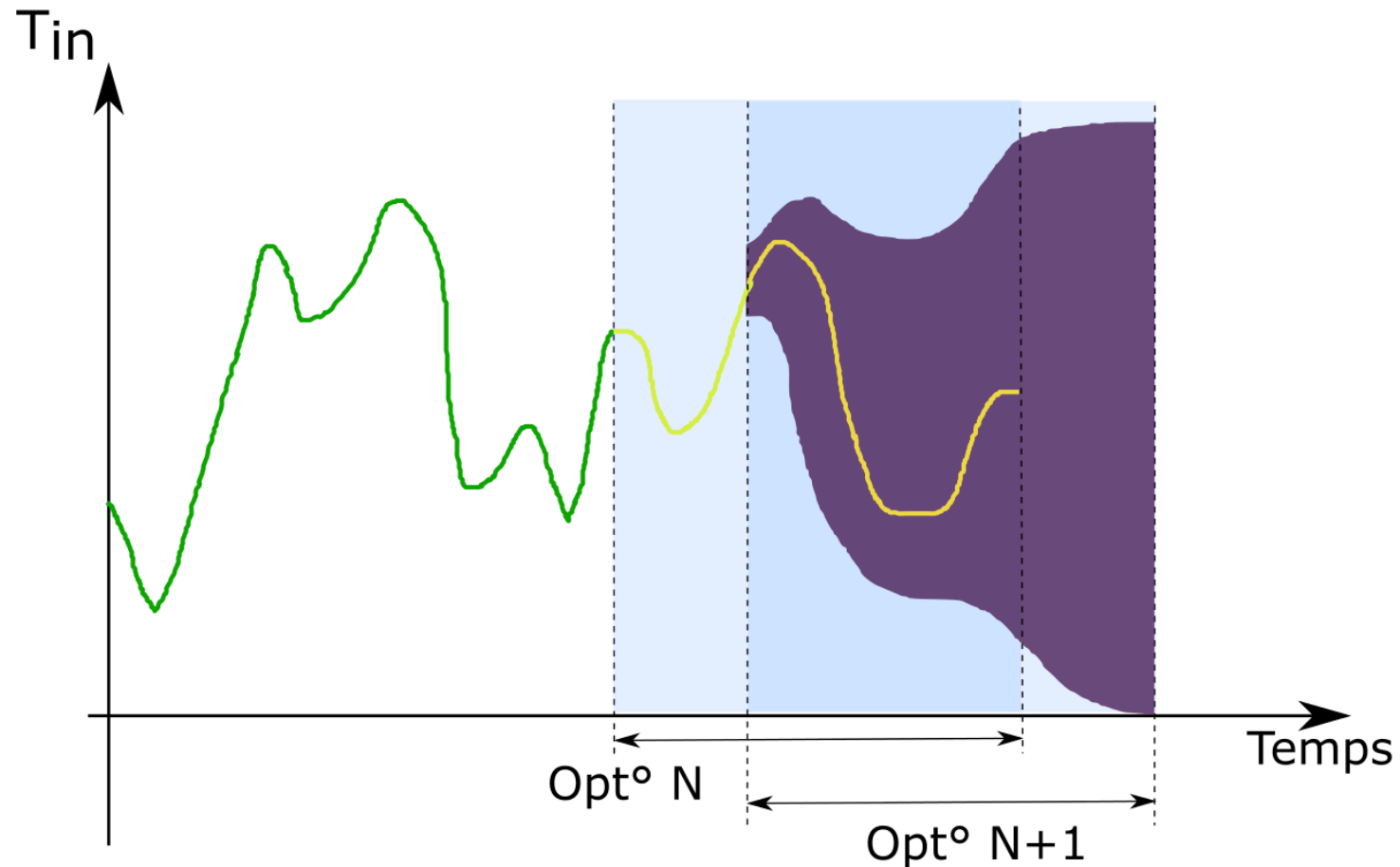
~  $10^4$  trajectoires simulées ; Temps de calcul ~ 2-3 min



Fenêtre glissante (24h) pour l'optimisation

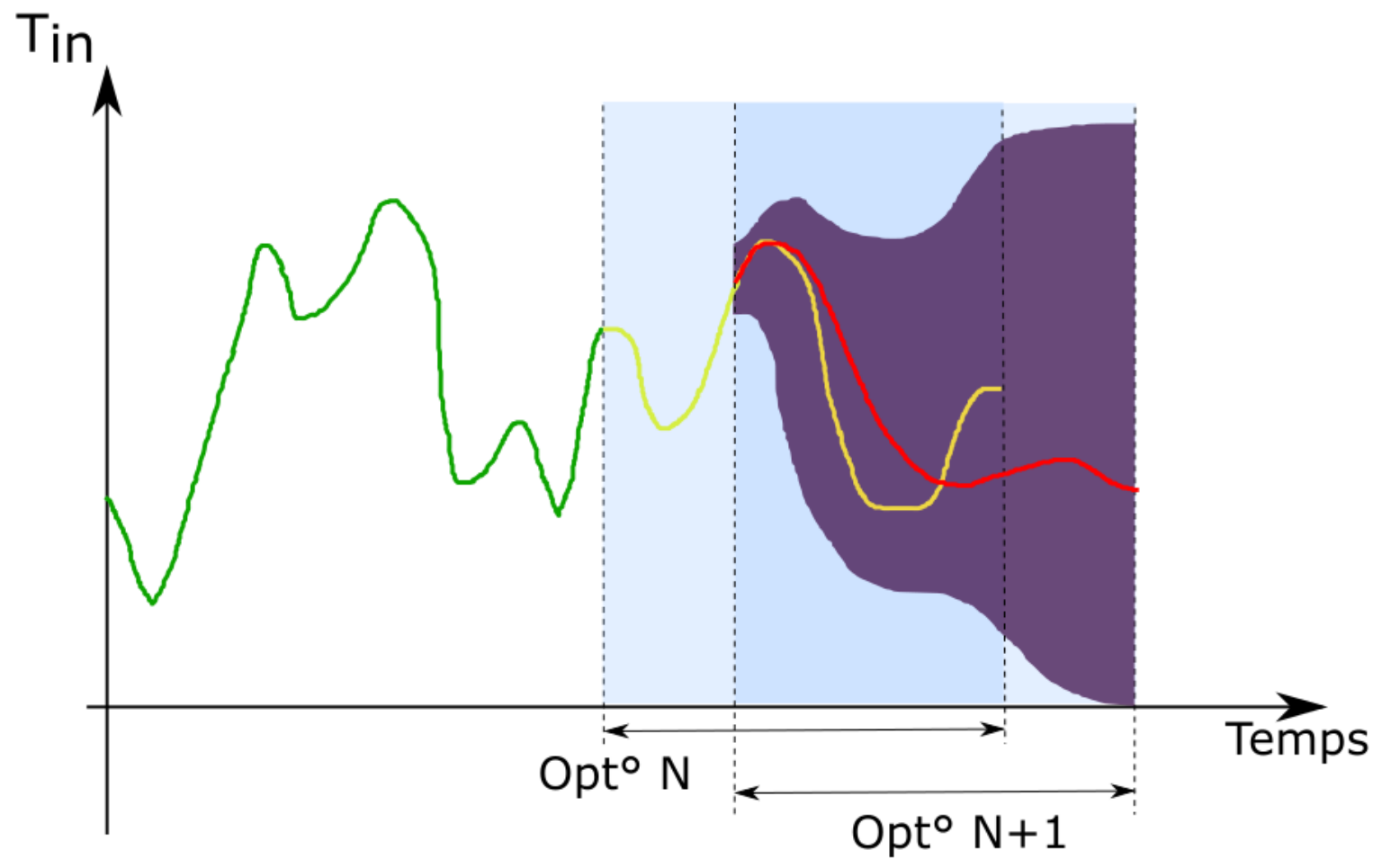


Fenêtre glissante (24h) pour l'optimisation, avec recouvrement (6h)

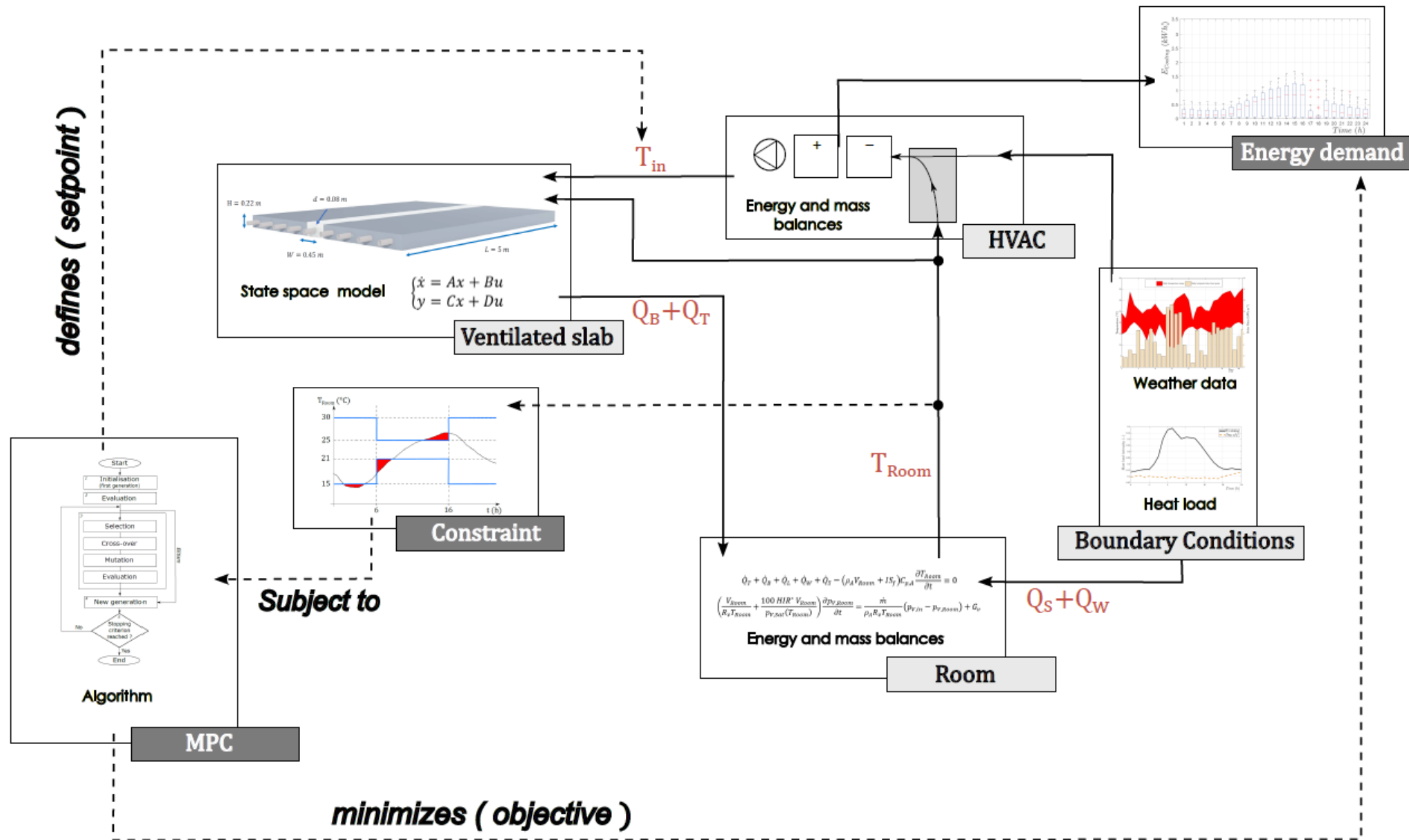


Fenêtre glissante, avec recouvrement et ER réduit selon trajectoire précédente

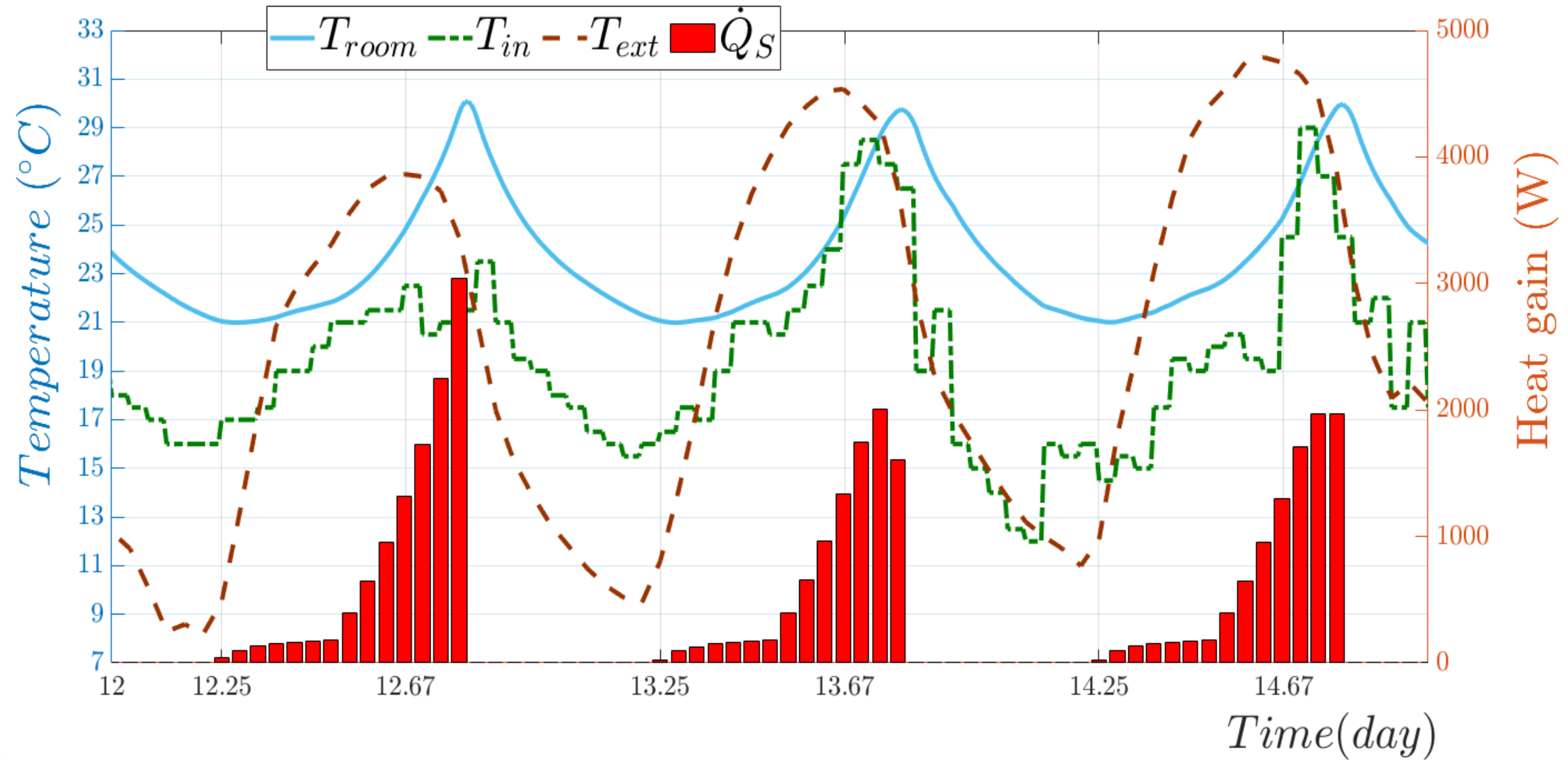


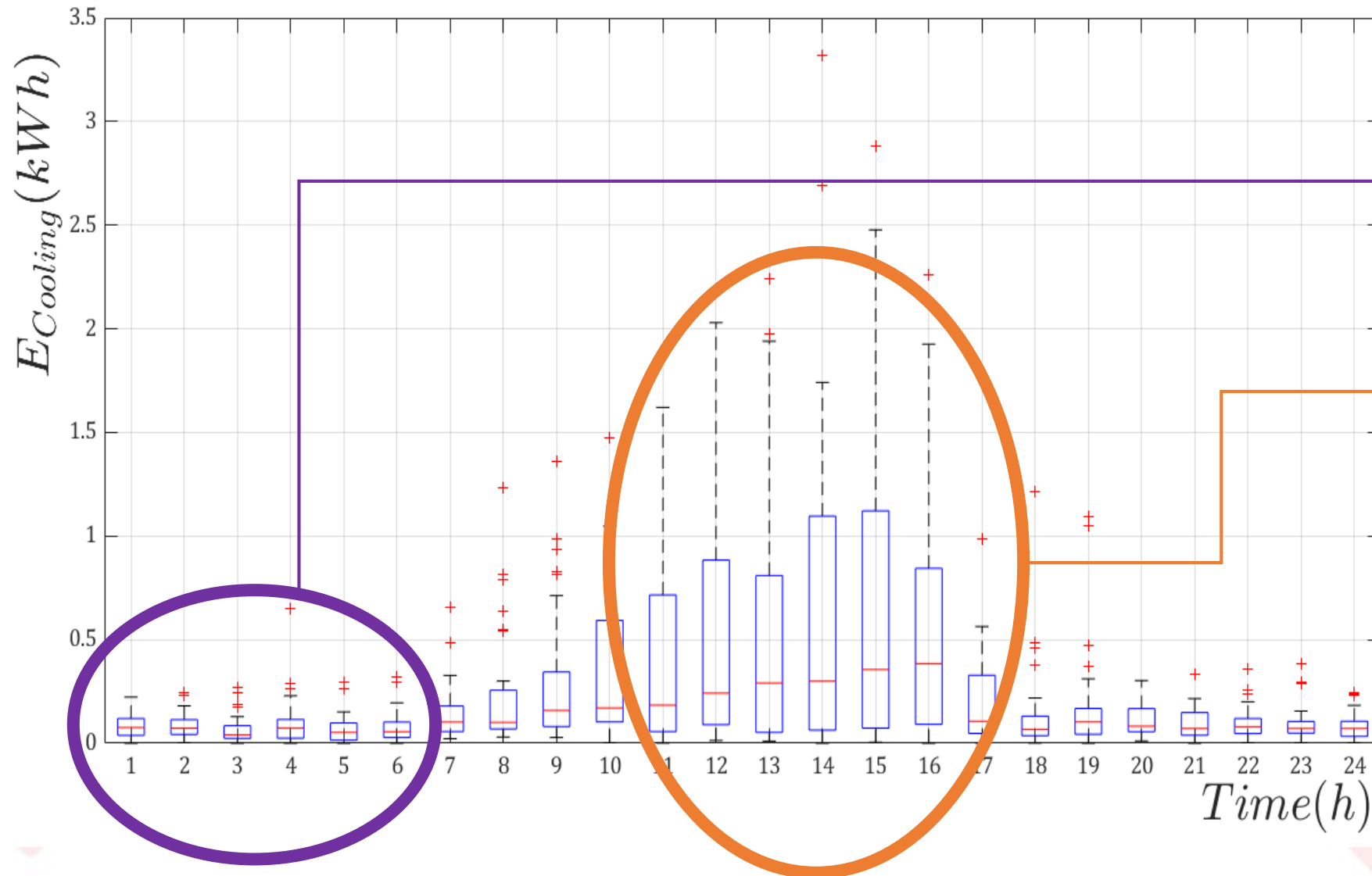


Signal optimisé



# Résultats - températures





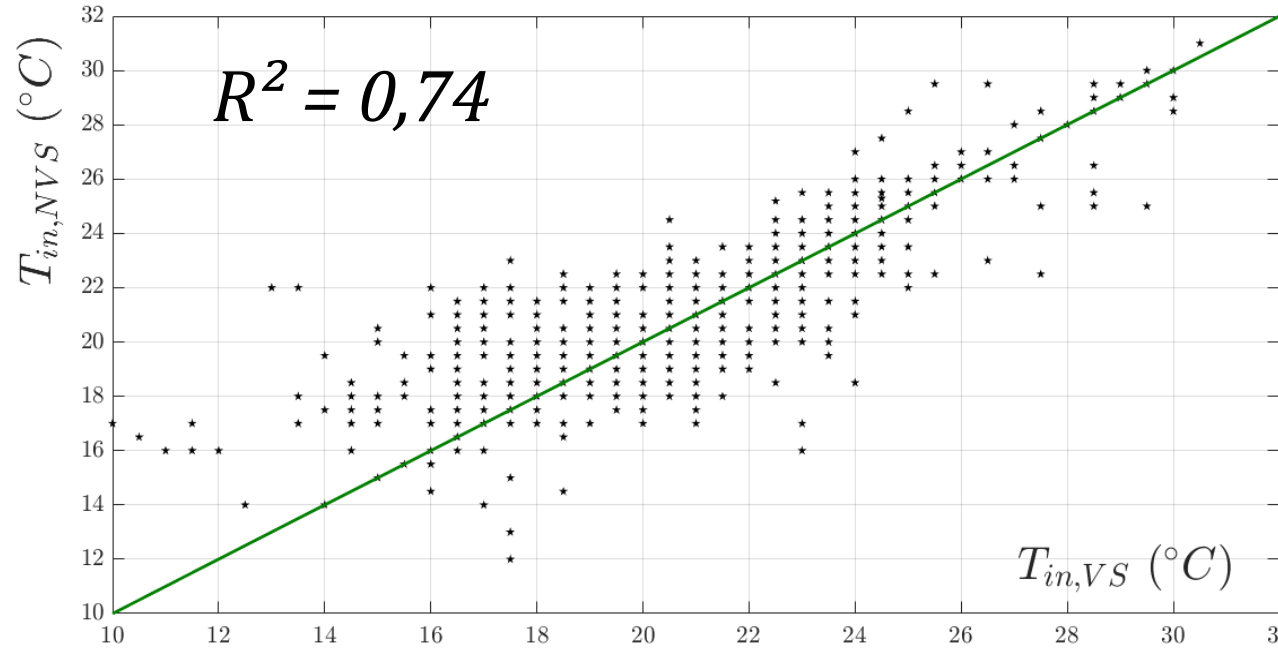
E ~ 0 le matin

E max en après midi

Pas de sous-refroidissement nocturne

Pas de stratégie  $f$  (COP)

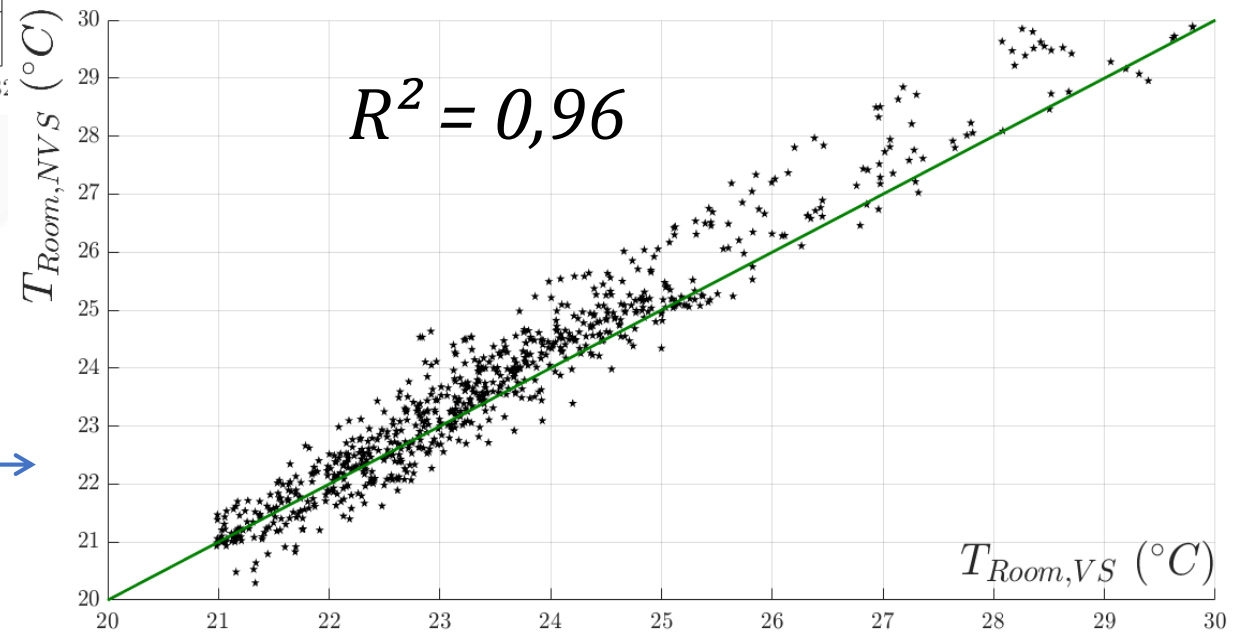




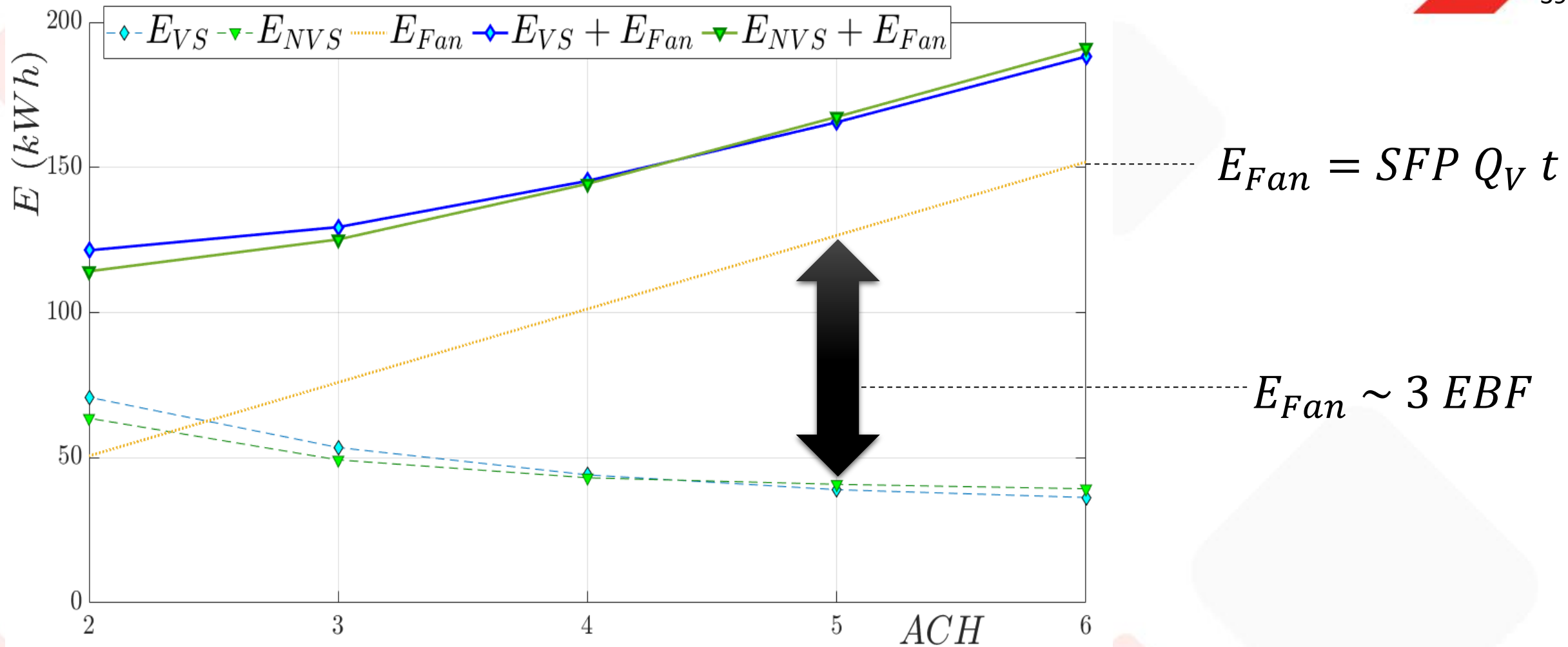
Température en entrée de dalle



Température intérieure

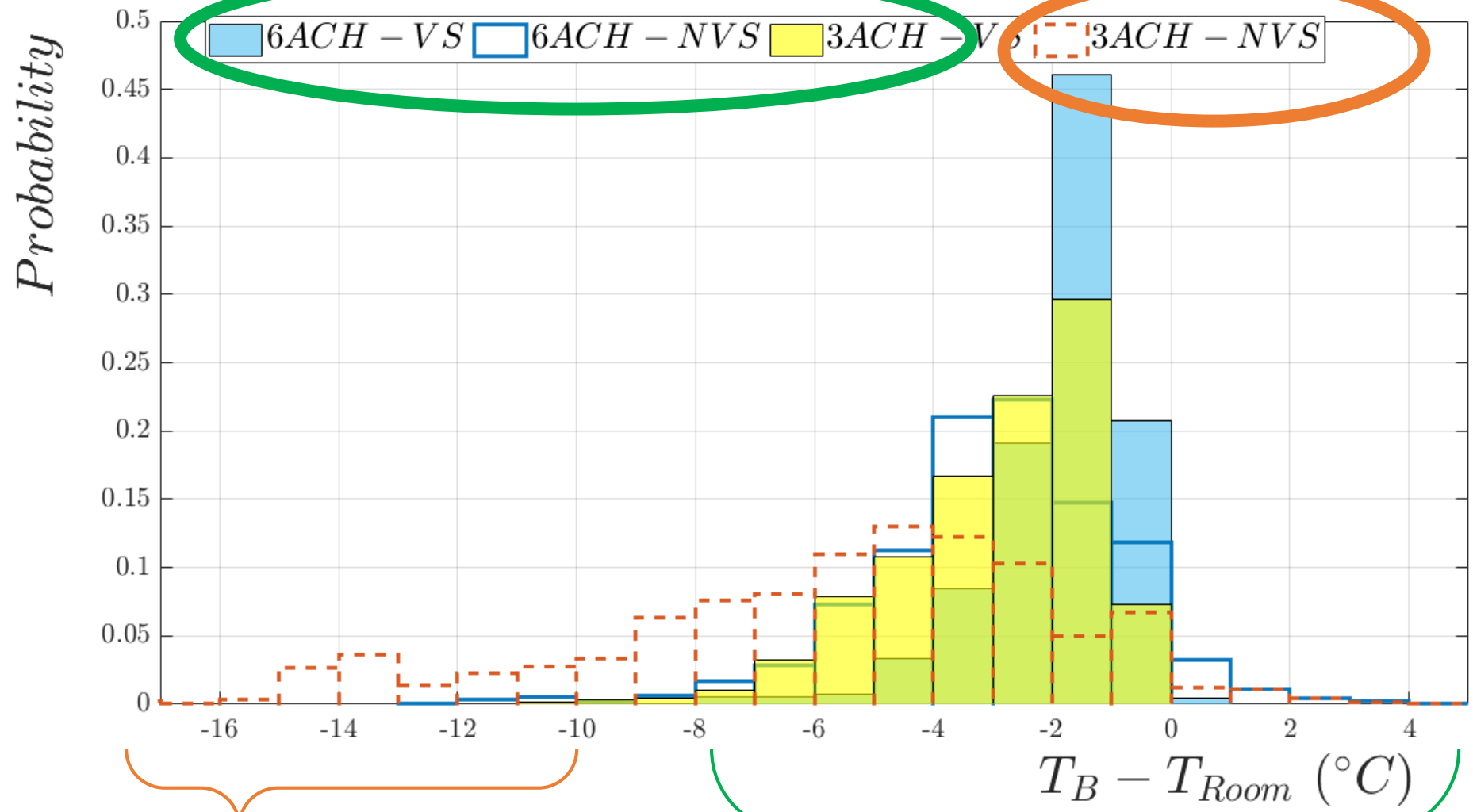


Air change rate	System	E (kWh)	$\theta$ (°C.h)
6 ACH	VS	$36,3 \pm 0,3$	$0,54 \pm 0,03$
	NVS	$39,3 \pm 0,2$	$0,14 \pm 0,01$
5 ACH	VS	$39,0 \pm 0,1$	$0,66 \pm 0,01$
	NVS	$40,8 \pm 0,4$	$0,15 \pm 0,01$
4 ACH	VS	$44,1 \pm 0,3$	$0,76 \pm 0,04$
	NVS	$43,1 \pm 0,4$	$0,15 \pm 0,01$
3 ACH	VS	$53,5 \pm 0,2$	$1,60 \pm 0,06$
	NVS	$49,2 \pm 0,4$	$0,51 \pm 0,02$
2 ACH	VS	$70,8 \pm 0,2$	$7,76 \pm 0,16$
	NVS	$63,6 \pm 0,3$	$6,07 \pm 0,09$



Il y a tout intérêt à minimiser le débit d'air soufflé (quelle que soit la dalle)

# Différentiel de soufflage



Inconfortable

Comfortable



## Modèle de dalle ventilée

- Passage modèle fin 3D → modèle état pour réduire le temps de calcul
- Forte influence du débit d'air soufflé
  - Bas débit = plus de flux transmis par conduction, joue sur l'inertie
  - Haut débit = plus de flux soufflé dans la pièce, joue peu sur l'inertie

## Contrôle de la dalle ventilée

- Modèle simple d'un bureau et de CTA, conditions estivales
- Méthode d'optimisation par algorithme génétique, étendue au contrôle prédictif
- Bonne répétabilité

## Résultats principaux

- Objectif de confort ( $T_{intérieure}$ ) atteint pour  $RA \in [ 3 : 6 ]$  ACH
- Chargement de la dalle à l'aide de l'air neuf (pas de production de froid nocturne)
- Consommations dalle ventilée / dalle classique semblables
- Meilleur différentiel de soufflage à l'aide d'une dalle ventilée
- Différences plus marquées lorsque le débit est faible ([2 : 3] ACH)

## Point de vue général sur les dalles ventilées

- Favorisent l'utilisation d'un débit d'air plus faible
- Performances similaires à un cas classique (à contrôle équivalent)
- Pas de preuve d'un potentiel d'économie d'énergie dans le cas étudié

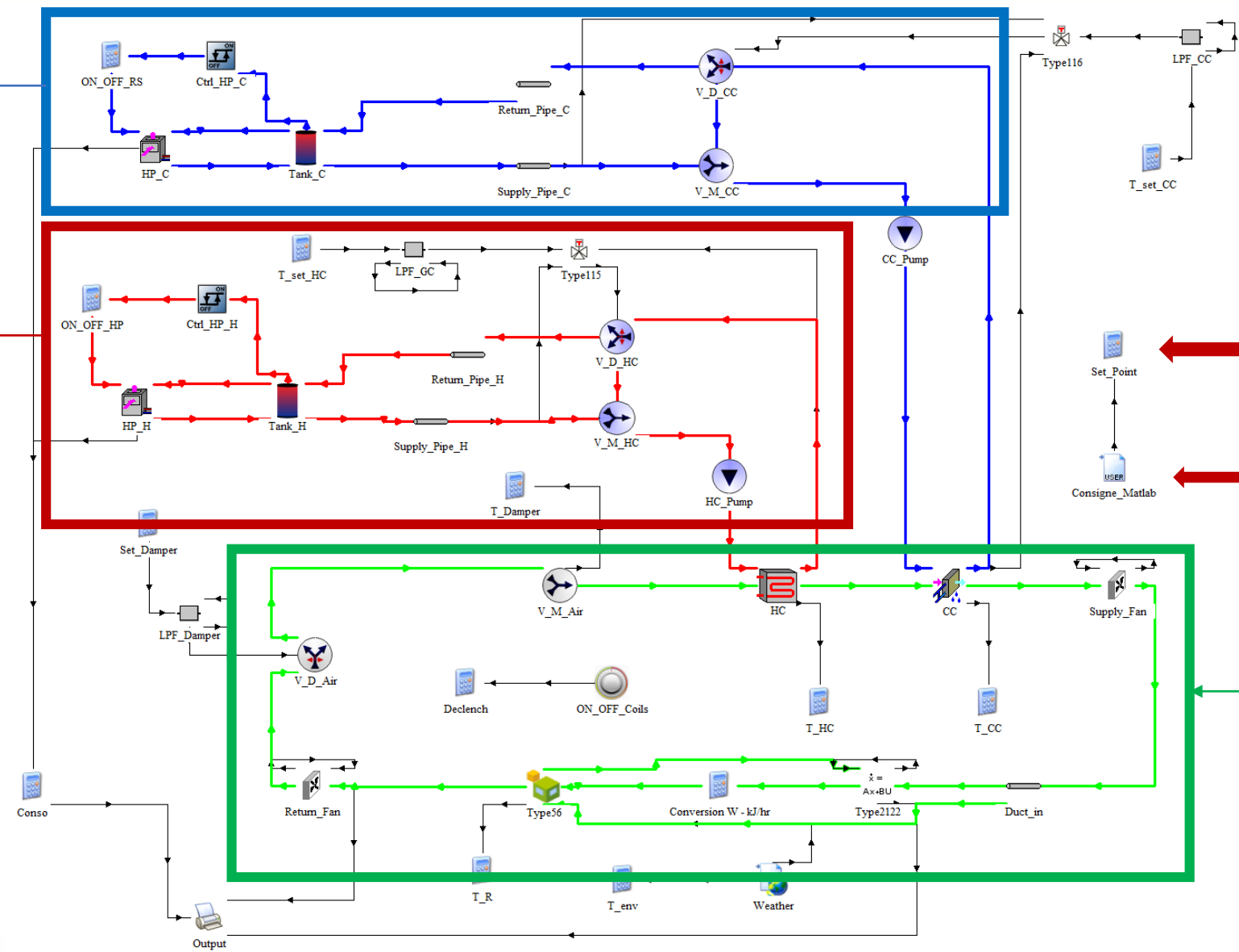
Circuit froid

Circuit chaud

Ensemble des propriétés du système

Vecteur consigne

Circuit d'air

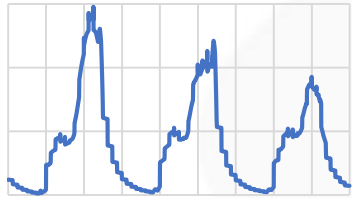


## Test pour charges variées en jouant sur

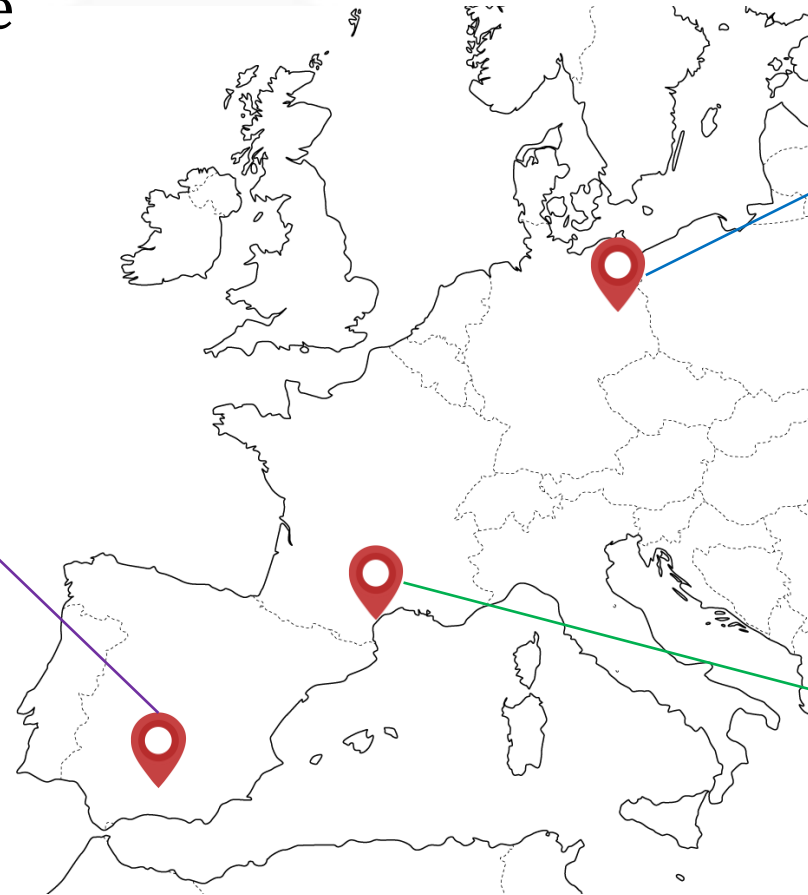
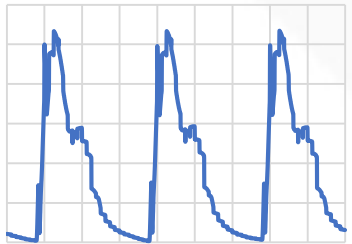
- Climat
- Orientation façade
- Débit d'air

### Cordoue

▣ Ouest

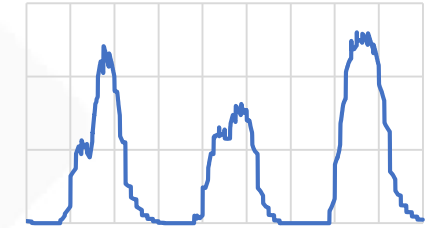


▣ Est

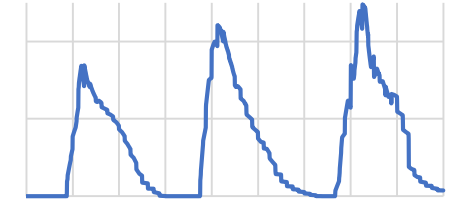


### Berlin

▣ Sud

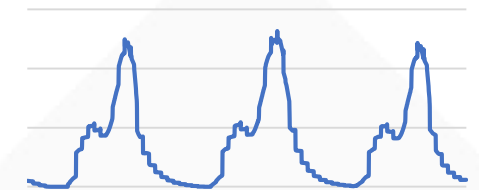


▣ Est

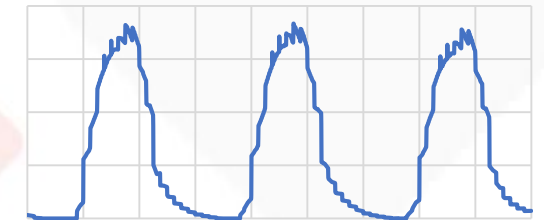


### Montpellier

▣ Ouest



▣ Sud





Présenté par  
**Matthieu Labat**

Collaborateurs  
**Ion Hazyuk (ICA)**  
**Clément Nevers**  
**Bassim Maaloul**  
**Alexandre Malley-Ernewein**

# Questions


Labat, M., Lorente, S., Mosa, M., 2020. Influence of the arrangement of multiple radiant ceiling panels on the radiant temperature field. International Journal of Thermal Sciences 149, 106184. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106184>

Labat M., Hazyuk I., Rabut G., Maaloul, B., « Modèle de substitution d'une dalle activée thermiquement », IBPSA France, Reims, 5-6 juillet 2021.

Labat, M., Hazyuk, I., Cezard, M., Lorente, S., 2021. Indoor thermal behaviour of an office equipped with a ventilated slab: a numerical study. Journal of Building Performance Simulation 14, 227–246. <https://doi.org/10.1080/19401493.2021.1905714>

C. Nevers, M. Labat, Etude numérique de la pertinence d'un système de dalle ventilée pour le refroidissement de locaux tertiaires en été, JNES Albi, 29 Juin 2022

Labat M., Hazyuk I., 2023. Numerical comparison of an office cooled with and without a ventilated slab using a Model Predictive Controller, Applied Thermal Engineering. Accepted



ACH	$\frac{\dot{Q}_T}{\dot{Q}_{Tot}}$	$\frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_{Tot}}$
2	55,0%	45,0%
6	39,3%	60,7%
10	30,3%	69,7%

Diffusion du flux de chaleur par la dalle → réduire le débit soufflé

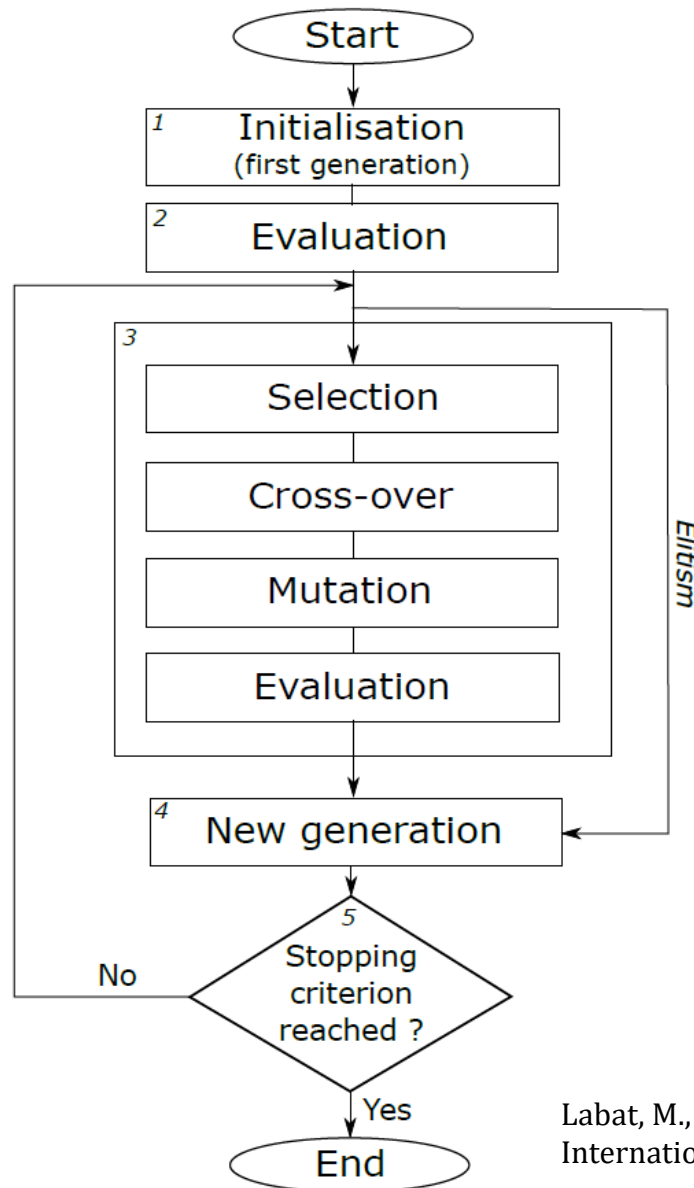
Bypass de l'inertie de la dalle (« mode turbo »)

→ augmenter le débit soufflé

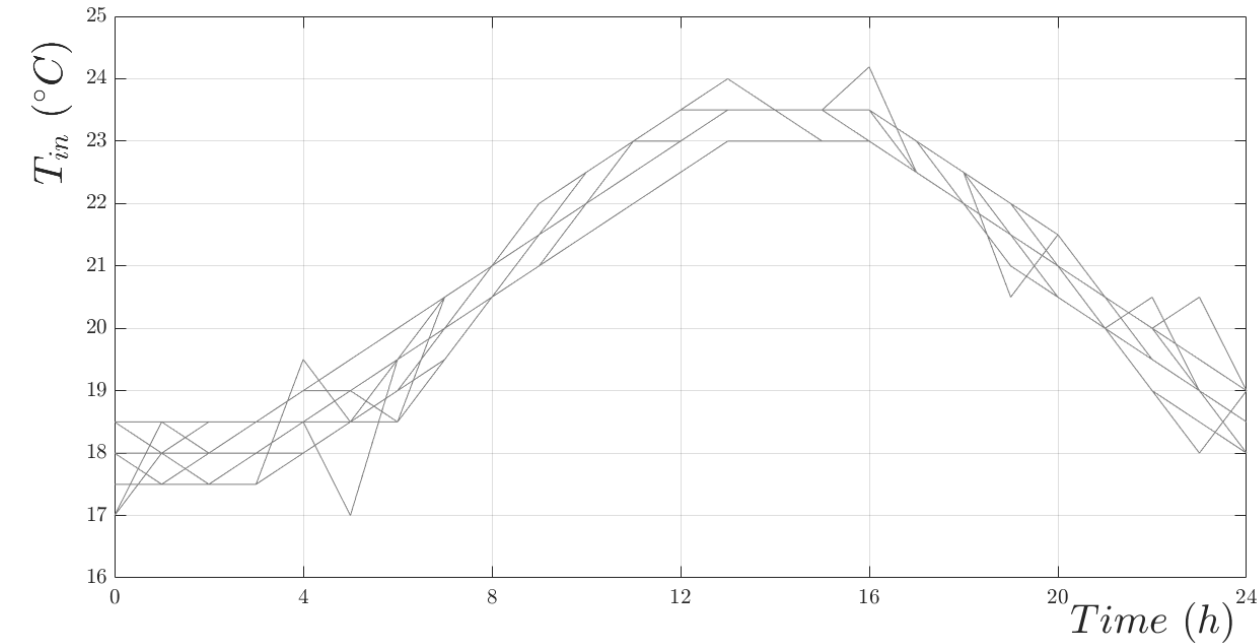
→ une partie sera stockée (et non distribuée)

## Algorithme d'optimisation évolutionnaire

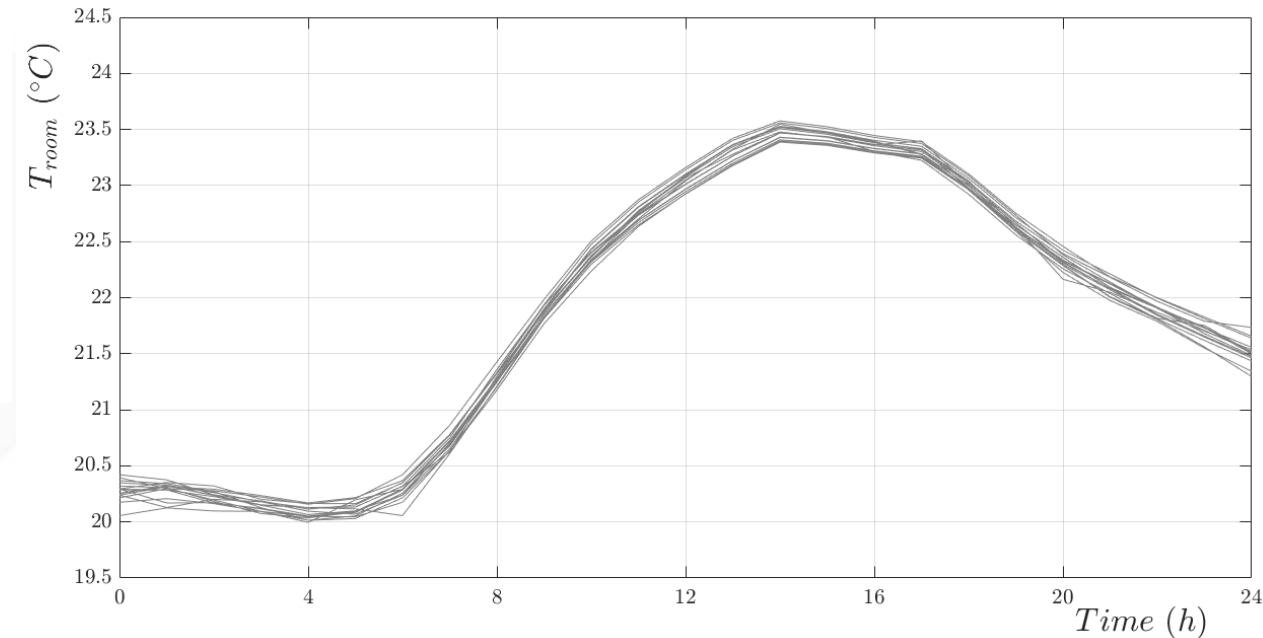
- Simule le comportement d'une population, constituée d'individus ( $\sim 50$ )
- 1 individu = 1 trajectoire dans l'ER.
- Utilise un ensemble de techniques pour converger tout en explorant l'ER.
- Nécessite d'être réglé pour chaque nouveau problème



## Répétabilité du processus (aléatoire), 16 tests



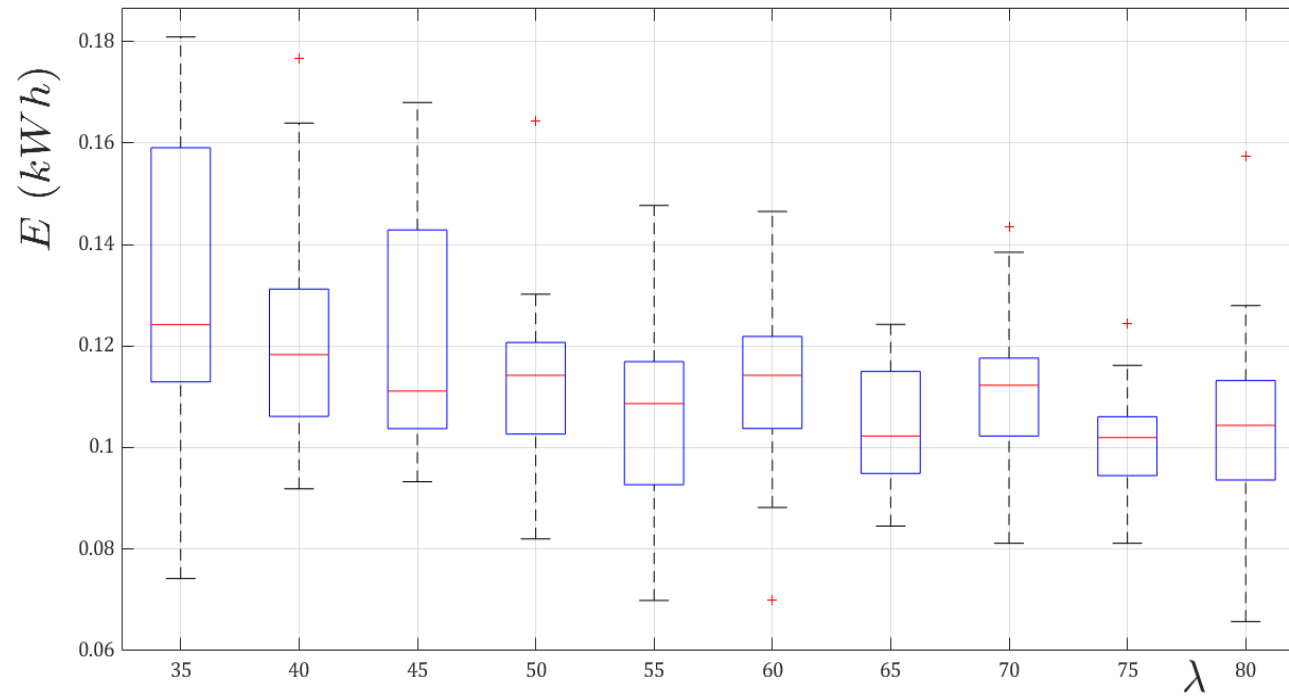
Température entrée de dalle



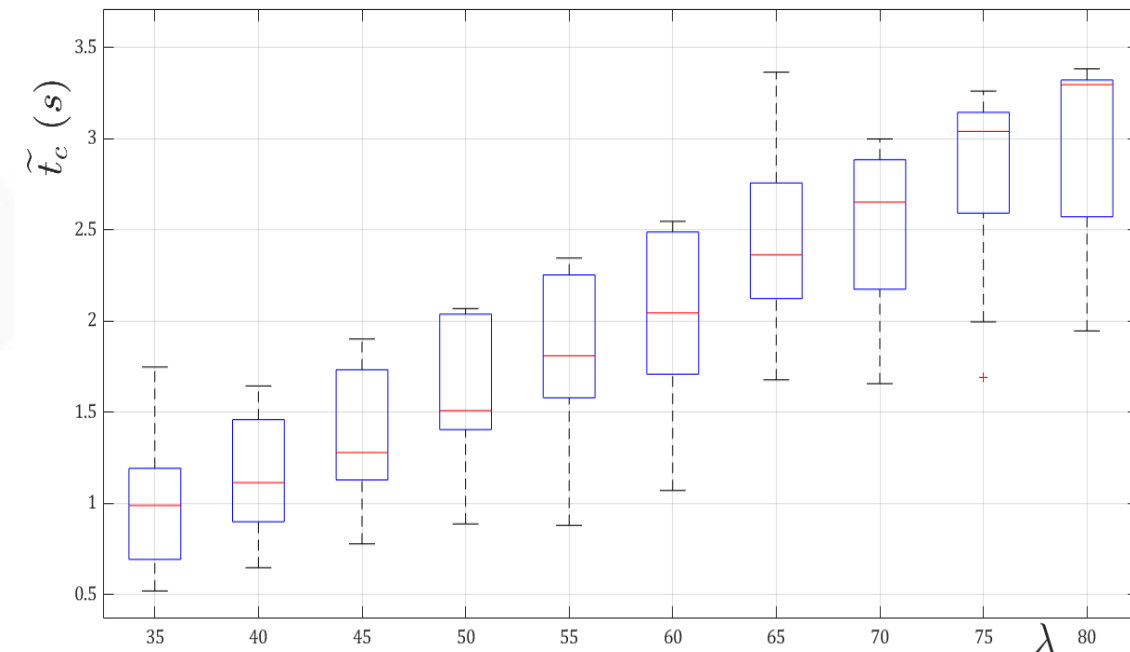
Température intérieure

## Phase de mise au point de l'algorithme

Selon la taille de la population  $\lambda$



Coût énergétique



Temps de calcul