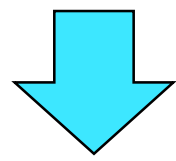


### Contexte – Objectifs

- Problématique de l'optimisation énergétique du bâtiment : grand défi des décennies à venir (Grenelle de l'environnement, COP21).
- À l'heure actuelle, les stratégies de gestion de l'énergie pour les bâtiments sont principalement fondées sur une concaténation de règles logiques.



- Développement d'une méthodologie en temps réel de simulation et de contrôle de l'efficacité énergétique.
- Développement de nouvelles techniques de suivi en continu et de contrôle adaptatif fondées sur la prédiction des conditions de confort intérieur, du comportement des utilisateurs et des prévisions météorologiques.
- La plateforme Eco-Sûr (CRAN) est la cible applicative

### Bilan hygrothermique dans une zone

- **Bilan thermique** ( $T_{\odot}$  : température intérieure)

$$1.15 \times C_{pda} V_{\odot} \dot{T}_{\odot}(t) = \sum_j q_{j\odot}(t)$$

- **Bilan hygrométrique** ( $\rho_{v\odot}$  : densité de vapeur d'eau)

$$V_{\odot} \dot{\rho}_{v\odot}(t) = \sum_j g_{j\odot}(t)$$

#### Echanges principaux d'humidité et de chaleur

- **Transferts par convection**

$$g_{1\odot}(t) = - \sum_{k=1}^n \frac{P_{\odot}(t)}{n_a} h_m S_{k\odot} (\rho_{v\odot}(t) - \rho_{vk\odot}(t))$$

$$q_{1\odot}(t) = - \sum_{k=1}^n h_c S_{k\odot} (T_{\odot}(t) - T_{k\odot}(t)) + h_v g_{1\odot}(t)$$

avec  $T_{k\odot}$  et  $\rho_{vk\odot}$  : température et densité de vapeur d'eau dans la paroi  $k$  en contact avec la zone  $\odot$

- **Mouvements d'air (ventilation / VMC / PAC)**

$$g_{2\odot}(t) = -Q_a (\rho_{v\odot}(t) - \rho_{v\odot}(t))$$

$$q_{2\odot}(t) = -1.15 \times Q_a C_{pda} (T_{\odot}(t) - T_{\odot}(t))$$

- **Occupants + rayonnement solaire**

### Bilan hygrothermique au sein d'une paroi

- **Bilan thermique**

$$\rho_k C_{pk} V_k \dot{T}_k(t) = -2S_k \times \sum_{\odot=\ominus, \odot} \frac{\lambda_k}{e_k} (T_k(t) - T_{k\odot}(t))$$

$$- \frac{2S_k \sigma h_v}{\rho_k C_{mk}} \times \sum_{\odot=\ominus, \odot} \frac{\delta_{pk}}{e_k} (\rho_{vk}(t) - \rho_{vk\odot}(t))$$

- **Bilan hygrométrique**

$$V_k \dot{\rho}_{vk}(t) = \frac{-2S_k}{\rho_k C_{mk}} \times \sum_{\odot=\ominus, \odot} \frac{\delta_{pk}}{e_k} (\rho_{vk}(t) - \rho_{vk\odot}(t))$$

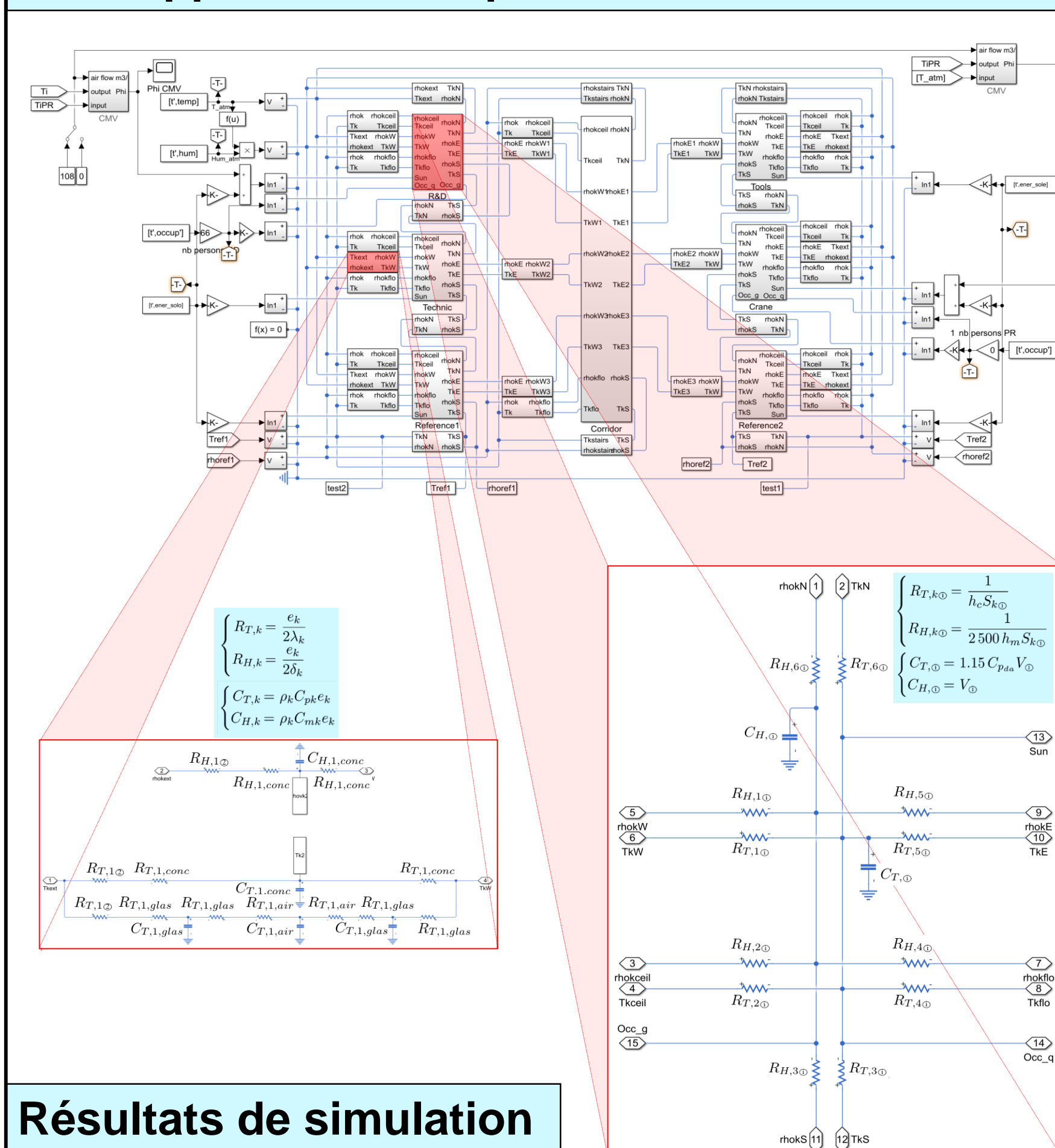
### Références

- **F. Gabsi**, F. Hamelin, and N. Sauer, "Building hygrothermal modeling by nodal method," in Proc. of the IEEE International Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Asia 2018), Singapore, May 2018.
- **F. Gabsi**, F. Hamelin, and N. Sauer, "Hygrothermal modeling and MPC-based control for energy and comfort management in buildings," in Proc. of the IEEE International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE 2018), Kajang, Malaysia, June 2018.
- **F. Gabsi**, F. Hamelin, N. Sauer and D. Sauter, "Fault-Tolerant Economic Model Predictive Control for Building Temperature Regulation using  $\ell_{\epsilon}$ -Regularization," in Proc. of the 4th Conference on Control and Fault Tolerant Systems (SysTol), Casablanca, Morocco, September 2019.

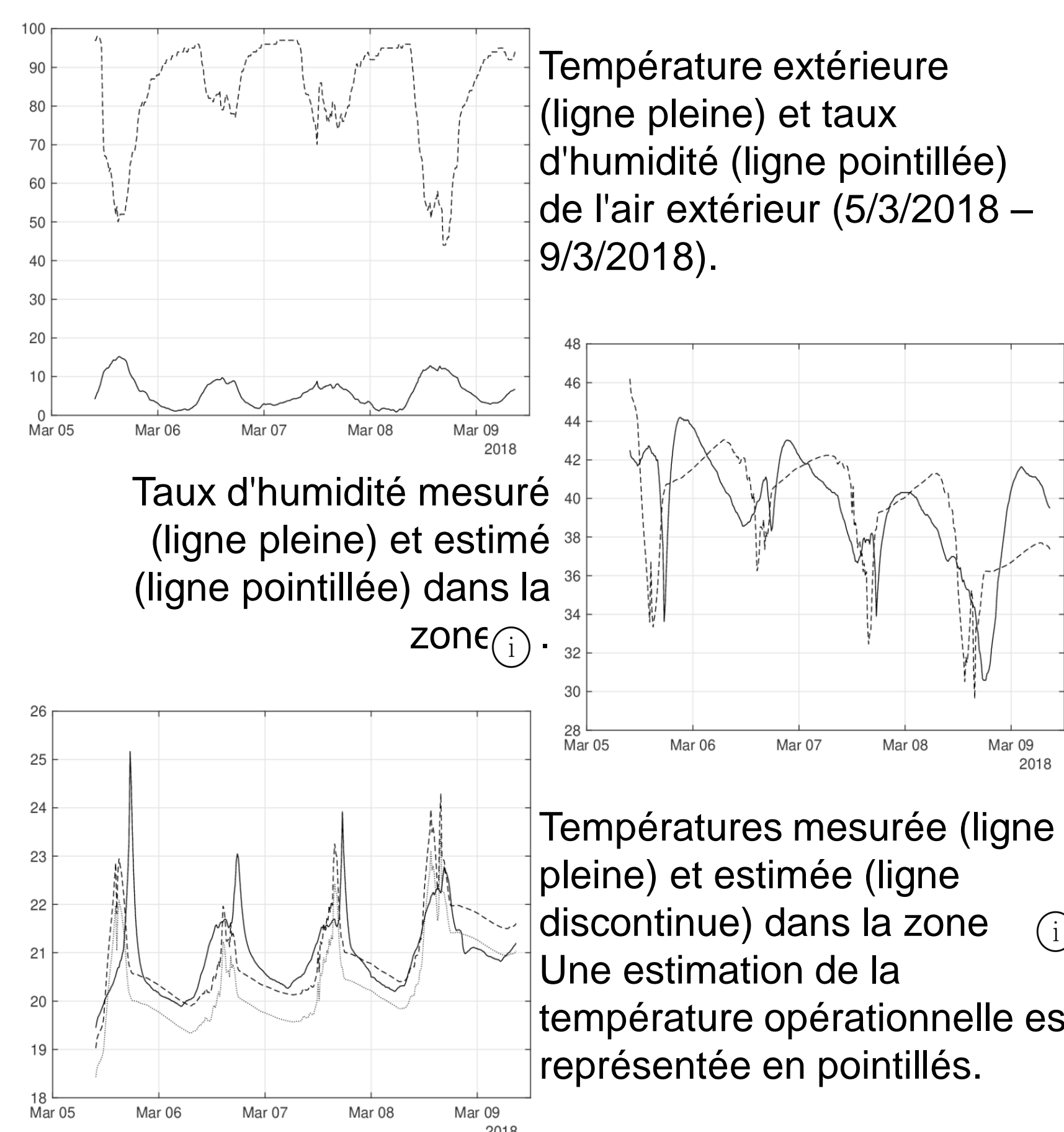
### Modèle hygrothermique Méthode nodale

- La température et la densité de vapeur d'eau sont représentées par des potentiels électriques.
- Les flux d'énergie et les transferts d'humidité sont représentés par des intensités de courant.
- Les résistances thermique et hygrométrique sont représentées par des résistances électriques.
- Les capacités thermiques et de rétention d'eau sont représentées par des condensateurs.

#### Application à la plate-forme "Eco-Sûr"



#### Résultats de simulation



### Commande prédictive

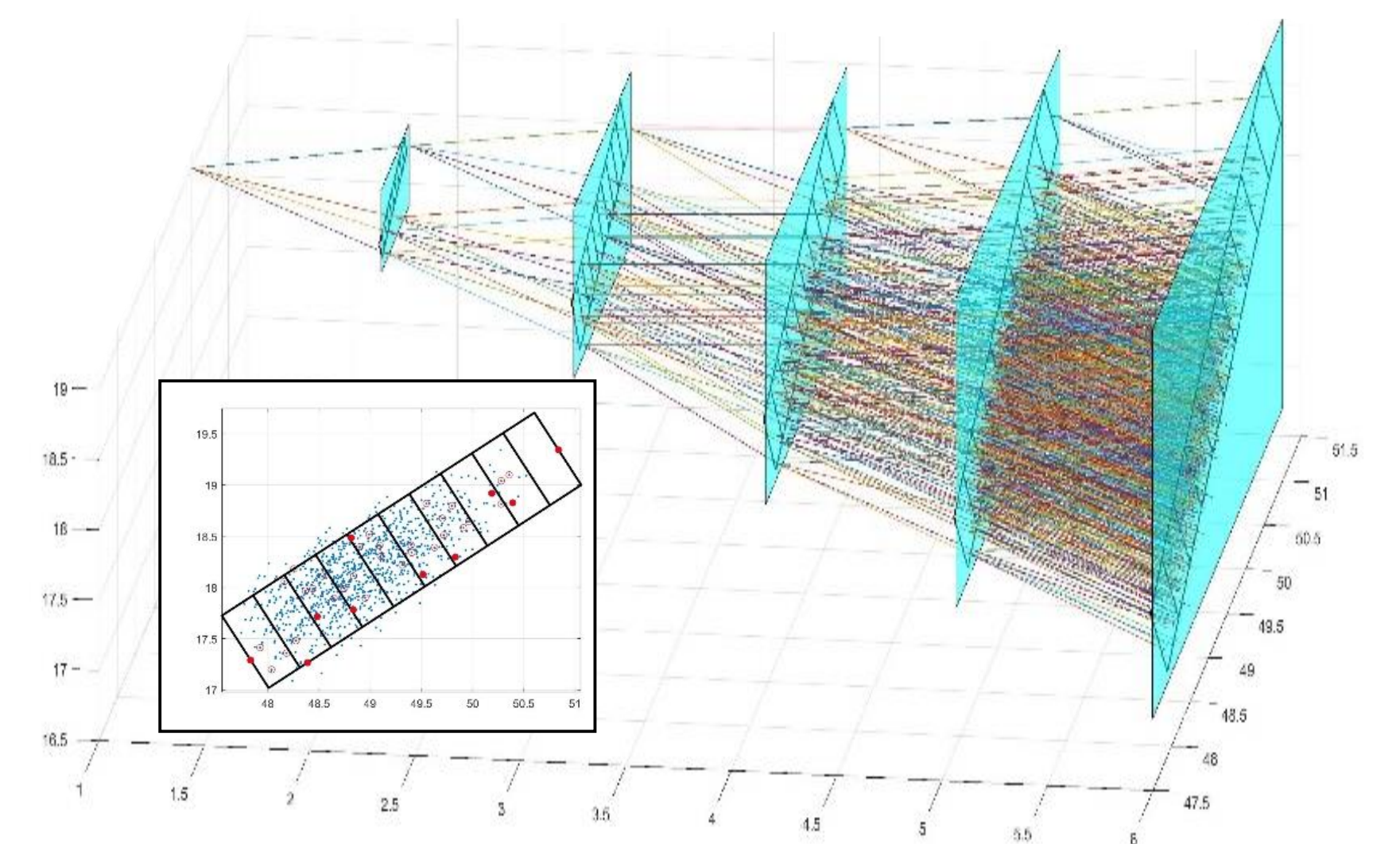
- Le modèle hygrothermique du bâtiment diffère suivant l'actionneur utilisé.
- Les actionneurs fonctionnent pour certains en TOR, et pour d'autres en continu.

#### Critère économique

- Prise en compte des objectifs de confort (thermique + hygrométrique) et du coût en euros de tous les scénarios de commande envisagés (Pompe à chaleur (PAC) on/off, VMC on/off, ouverture motorisée de fenêtres, asservissement des stores) :

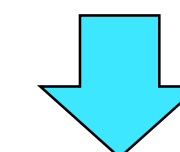
$$J_{MPC}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) = \min_{\mathbf{u}} \sum_{j=1}^{N_p} \left( \|T_{OP}(k+j) - T_{COMF}(k+j)\|_{T_j}^2 + \|\mathbf{u}(k+j)\|_{\epsilon_{u_j}}^2 + \|\Delta \mathbf{u}(k+j)\|_{\epsilon_{\Delta u_j}}^2 \right)$$

- Recherche d'une solution approchée par discrétisation de l'espace des variables de sortie



#### Régularisation

- Une fenêtre (ou un store) peut être fréquemment ouverte/fermée (actionné) mais ce n'est pas le cas d'une PAC : risque de casse du compresseur, surconsommation énergétique.

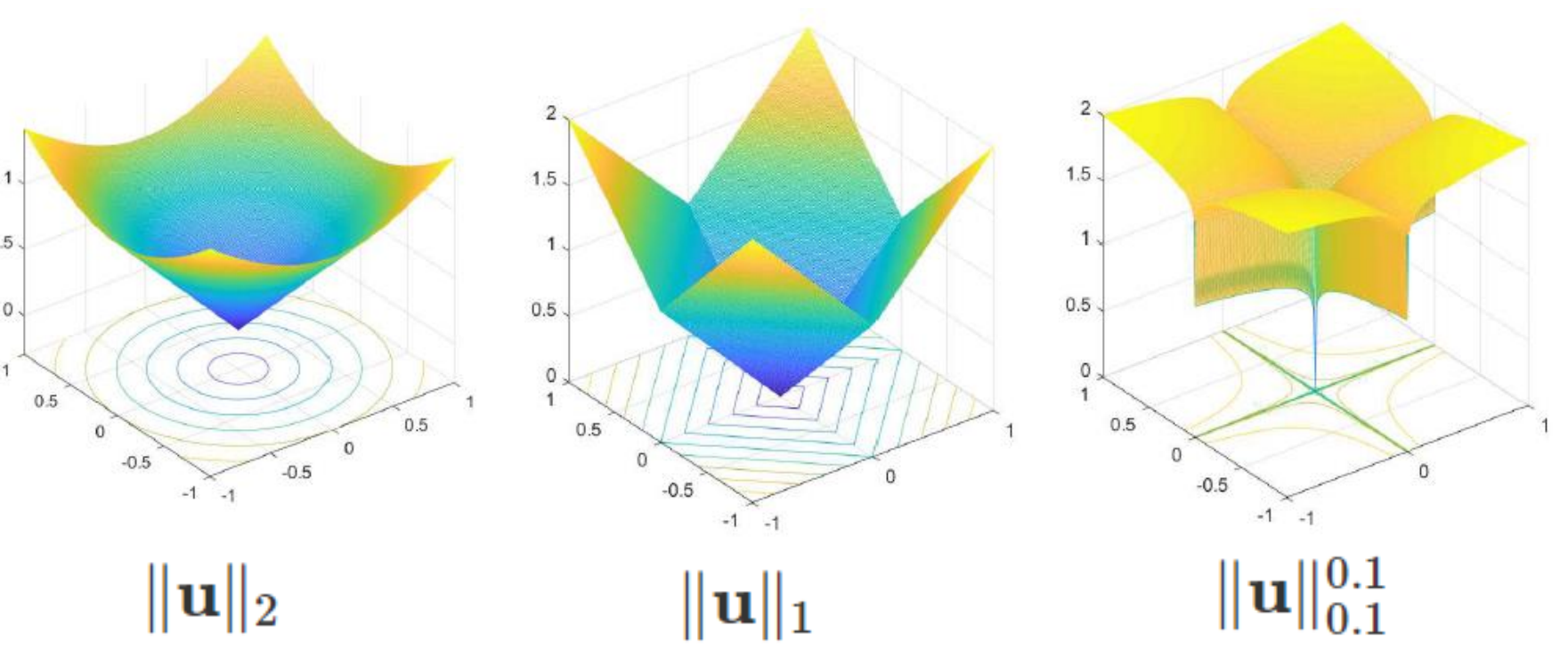


- Prise en compte des contraintes de fonctionnement des actionneurs par définition d'un critère régularisé :

$$J_{\lambda, \Omega}(\mathbf{u}) = (1 - \lambda) J_{MPC}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) + \lambda \Omega(\mathbf{u})$$

- Le terme de régularisation est choisi de norme  $\ell_{\epsilon}$  (propriété de parcimonie) pour que les valeurs de  $\mathbf{u}$  privilégient  $u_i$  :

$$\Omega(\mathbf{u}) = \alpha_1 \left\| \left( \bigodot_{i=1}^{NB} (\mathbf{u} - u_i \mathbf{1}) \right) \right\|_{\epsilon}^{\epsilon}$$



### Commande prédictive tolérante aux défauts

Hypothèse : en présence de défauts naissants sur certains actionneurs, le souhait est de continuer à les utiliser :

- avec moins de sollicitations (par exemple, réduction du nombre de cycles marche/arrêt sur une pompe à chaleur en cas de dysfonctionnement d'un compresseur) ;
- en redistribuant différemment la puissance thermique (par exemple, pour une centrale de traitement d'air ayant une panne de ventilateur d'alimentation et alimentant une grande pièce en air par plusieurs registres à volume d'air variable (VAV)).

#### Régularisation

- Prise en compte des objectifs par adaptation du terme de régularisation

$$\Omega(\mathbf{u}) = \gamma_1 \left\| \mathbf{R}_0 \left( \bigodot_{i=1}^{NB} (\mathbf{u} - \bar{u}_i \mathbf{1}) \right) \right\|_{\epsilon}^{\epsilon} + \gamma_2 \left\| \mathbf{R}_0 (\mathbf{u} - u_{i,f} \mathbf{1}) \right\|_{\epsilon}^{\epsilon}$$

$$+ \alpha_1 \left\| \mathbf{R}_1 [u_i(k) \quad \mathbf{u}_f^T]^T \right\|_{\epsilon}^{\epsilon} + \alpha_2 \sum_{j=1}^{N_p} \left\| \mathbf{R}_0 \mathbf{u}(k+j) \right\|_{\epsilon}^{\epsilon}$$

### Conclusions – Perspectives

- Une méthode nodale a été utilisée pour modéliser le comportement hygrothermique d'un bâtiment multizone.
- Une commande prédictive à critère économique régularisé et tolérante aux défauts d'actionneurs a été synthétisée avec prise en compte des contraintes de fonctionnement des actionneurs.
- ➡ Parfaire le modèle hygrométrique par approche nodale en tenant compte des interactions thermiques.
- ➡ Parfaire avec le plus de réalisme possible la notion d'optimum de la commande prédictive (régularisation, inertie d'actionneurs, algorithme de résolution,...).
- Mettre en application sur la plateforme Eco-sûr.