

Etude numérique thermo-aéraulique d'un local équipé d'une armoire électrique thermosensible : Analyse de sensibilité

Rafik MOULOUEL^{1,2,3*}, Marc ABADIE^{2,3}, Patrick SALAGNAC^{2,3}, Pascal BOREL¹, Maxime HOUVIN¹

¹EDF R&D-PRISME, 6 quai Watier – 78400 Chatou

²LaSIE (UMR CNRS 7356) – La Rochelle Université

³Laboratoire Commun 4evLab, CNRS - EDF R&D - LaSIE

* (auteur correspondant : rafik.moulouel@edf.fr)

Résumé - Cet article propose un modèle thermo-aéraulique, basé sur la méthode nodale et réalisé sous OpenModelica, d'une armoire électrique (armoire de contrôle-commande ou un tableau électrique) implantée dans un local expérimental dont le but est d'estimer des grandeurs thermiques et aérauliques nécessaires au bon fonctionnement et à la sécurité des équipements. On s'intéresse ainsi à l'évaluation des champs de température, des débits d'air et flux thermiques à différents niveaux au sein de l'armoire ainsi que dans le local. L'étude de sensibilité de ce modèle permet une meilleure compréhension des phénomènes intervenants au niveau d'un tableau électrique, qui influent sur les champs de température de l'air au sein du local.

Nomenclature

C	capacité thermique, J.K ⁻¹	ϕ	flux de chaleur, W
C_d	coefficient de décharge	ρ	masse volumique, kg.m ⁻³
h	coefficient d'échange, W.m ⁻² .K ⁻¹	<i>Indices et exposants</i>	
\dot{m}	débit massique, kg.s ⁻¹	cv	convectif
n	taux de renouvellement, h ⁻¹	r	radiatif
p	pression, Pa	cd	conductif
S	surface, m ²	arm	armoire
T	température, K	s	surface
V	volume, m ³	$emet$	émetteur
v	vitesse, m.s ⁻¹	env	enveloppe
<i>Symboles grecs</i>			
ε	émissivité		

1. Introduction

Les locaux équipés d'armoires électriques contenant des matériels thermosensibles sont des environnements complexes. Leur conditionnement thermique constitue un enjeu élevé. Ces équipements électriques sont dimensionnés pour fonctionner dans des plages spécifiques de température de l'air afin de garantir leur bon fonctionnement.

Les modèles thermo-aérauliques peuvent jouer un rôle important dans la compréhension des phénomènes intervenants au sein de ces locaux. La modélisation 3D permet l'étude approfondie du comportement de locaux fortement dissipateurs de chaleur [1], mais reste coûteuse en temps de calcul, notamment pour la réalisation d'études de sensibilité. La modélisation nodale, quant à elle, permet de prédire d'une manière satisfaisante les grandeurs thermiques et aérauliques à l'échelle d'une pièce ou d'un bâtiment. Les travaux de modélisation se rapprochant le plus du cas étudié concernent les centres de données informatiques. On peut citer notamment Kaced [2] qui a développé un modèle nodal d'une pièce équipée d'une baie informatique dissipant de la chaleur. Les résultats de son modèle corroborent les mesures, malgré l'utilisation de plusieurs corrélations extraites de la littérature. Iyengar et al. [3] ont aussi développé différents modèles

thermo-aérauliques afin de caractériser les performances énergétiques et thermiques dans un centre de données informatiques.

Dans cet article, le moyen d'essai d'EDF R&D « Local Témoin CNPE » est d'abord présenté. Ensuite son modèle nodal, permettant la prédiction des conditions thermo-aérauliques dans ce local ainsi qu'à l'intérieur de l'armoire électrique, est détaillé. Enfin, une étude de sensibilité en régime stationnaire est menée afin d'évaluer l'influence de certains paramètres sur les températures de l'air du local. Ces modèles seront par la suite calés à l'aide de mesures expérimentales.

2. Présentation et modélisation du moyen d'essai

Le moyen d'essai « Local Témoin CNPE » est un local en béton de dimensions externes $12,07 \times 3,95 \times 2,86 \text{ m}^3$ (Figure 1). Le sol est constitué d'un faux plancher isolé. L'épaisseur des murs est de 0,2 m. Le local dispose d'une ventilation mécanique. Il intègre une bouche de soufflage et une bouche de reprise d'air de dimensions $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$. Afin de maîtriser les conditions de température aux limites des parois externes du local, une enceinte complémentaire isolée est mise en place avec un conditionnement thermique de l'air entre-enceintes à l'aide d'une ventilation auxiliaire dans cet espace via des gaines souples microperforées. Le local est équipé d'armoires, fermées et ventilées naturellement, dissipant de la chaleur à l'aide de plusieurs résistances électriques, réparties selon la hauteur de l'armoire, afin d'obtenir une puissance surfacique représentative des cas d'usage des locaux électriques et de contrôle-commande d'un site nucléaire. Ce local, fortement instrumenté, a vocation à augmenter la robustesse des outils de calcul.

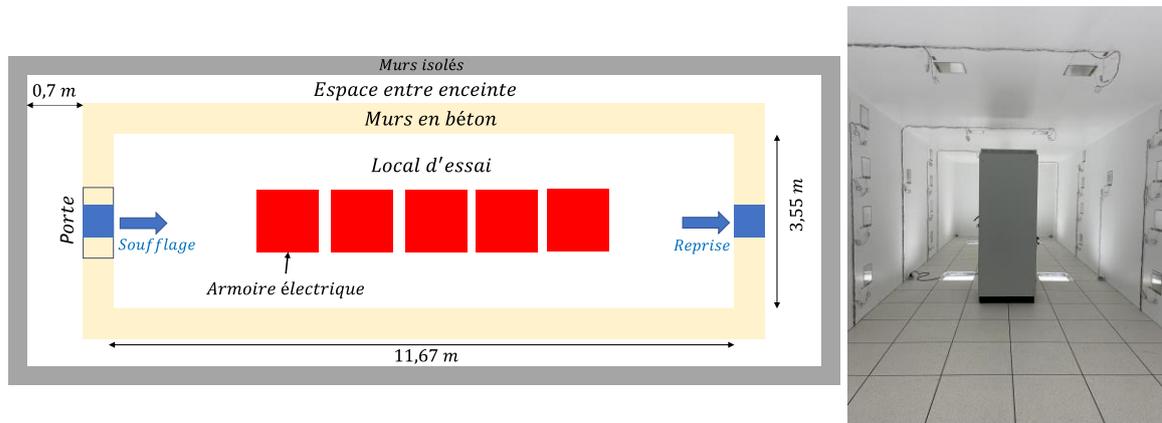


Figure 1 : Schéma (à gauche) et photographie (à droite) du moyen d'essai « Local Témoin ».

2.1. Modèle du local

La Figure 2 présente les principaux échanges entre l'air du local, les murs en béton et l'armoire électrique.

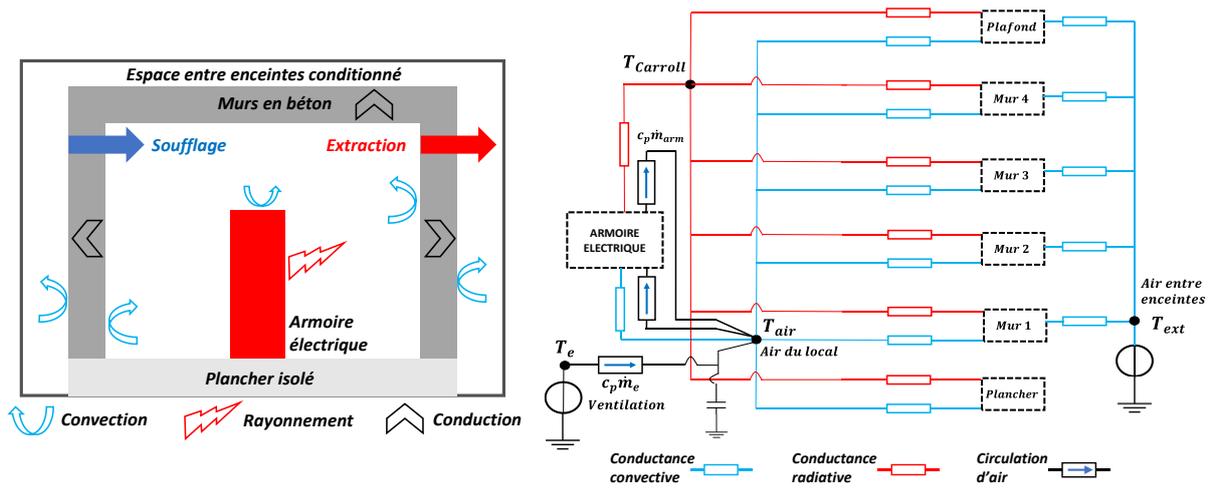


Figure 2 : Illustration des phénomènes thermo-aérauliques (à gauche) et modèle thermique équivalent du local témoin (à droite).

L'air du local dispose d'une capacité thermique, $C_{air}^{local} = \rho_{air} c_{p_{air}} V_{local}$, il échange par convection naturelle avec les faces internes des murs en béton et avec la surface de l'armoire électrique. A ceci, il est important de rajouter le transport convectif lié à la ventilation du local et le transport convectif entre l'air du local et l'air au sein de l'armoire. L'équation de bilan au niveau du nœud d'air du local s'exprime alors :

$$C_{air}^{local} \frac{\partial T_{air}^{local}}{\partial t} = \dot{m}_e c_p (T_e - T_{air}^{local}) + \sum_{i=1}^6 h_{cv} S_{mur_i} (T_s^{mur_i} - T_{air}^{local}) + h_{cv} S_{arm} (T_s^{arm} - T_{air}^{local}) + \dot{m}_{arm} c_p (T_{air}^{arm} - T_{air}^{local}) \quad (1)$$

Le coefficient d'échange convectif h_{cv} est calculé à l'aide de corrélations de l'ASHRAE [4].

Au sein des murs, le transfert de chaleur est de type conductif. Les murs sont discrétisés en plusieurs couches selon l'épaisseur. L'armoire électrique échange par convection avec l'air du local et par rayonnement avec les parois. Le modèle de l'armoire est précisé par la suite. La température de l'air entre enceintes est considérée homogène et constante. En effet, un soufflage à faible vitesse d'air dans cet espace est réalisé à l'aide de deux gaines souples microperforées entourant le local.

Les échanges radiatifs entre les parois du local et de l'armoire électrique sont calculés à l'aide de la méthode de Carroll [5]. L'équation de bilan au nœud de Carroll reliant les 6 murs du local et l'armoire électrique peut s'écrire de la façon suivante :

$$\sum_{i=1}^6 \phi_r^{mur_i} + \phi_r^{arm} = 0 \quad (2)$$

2.2. Modèle de l'armoire électrique

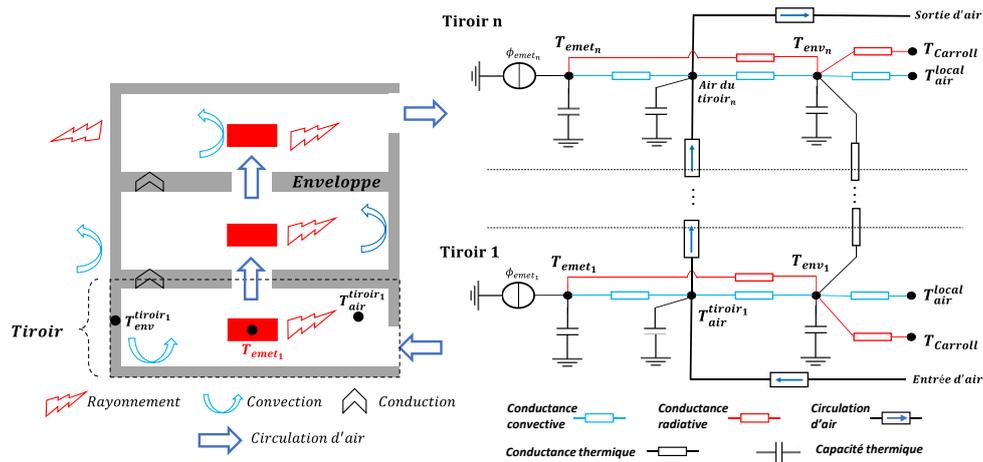


Figure 3 : Illustration des transferts thermiques au sein de l'armoire (à gauche) et modèle thermique équivalent (à droite).

L'armoire électrique se compose de 4 tiroirs superposés (Figure 3). Chaque tiroir est modélisé par une structure enveloppe qui entoure un émetteur thermique massique et un volume d'air. Ces émetteurs échangent par rayonnement avec l'enveloppe de l'armoire et par convection naturelle avec l'air à l'intérieur du tiroir. L'enveloppe quant à elle, échange par convection avec l'air du local et par rayonnement avec le nœud de Carroll. L'armoire dispose également d'ouvertures au niveau des tiroirs du bas et du haut permettant une circulation d'air au sein de l'armoire. Le rayonnement entre les différents émetteurs est négligé. Il est supposé que les émetteurs ne se voient pas.

L'émetteur thermique est modélisé par un nœud, dont le bilan s'écrit :

$$C_{emet_i} \frac{\partial T_{emet_i}}{\partial t} = P_{emet_i} + h_{cv} S_{emet_i} (T_{air}^{tiroir_i} - T_{emet_i}) + h_r S_{emet_i} (T_{env_i} - T_{emet_i}) \quad (3)$$

L'air à l'intérieur d'un tiroir i échange par convection naturelle avec l'émetteur et les parois de l'enveloppe de l'armoire. La circulation d'air dans l'armoire contribue également dans l'équation de bilan qui s'écrit alors :

$$C_{air}^{tiroir_i} \frac{\partial T_{air}^{tiroir_i}}{\partial t} = h_{cv} S_{emet_i} (T_{emet_i} - T_{air}^{tiroir_i}) + h_{cv} S_{env_i} (T_{env_i} - T_{air}^{tiroir_i}) + \dot{m}_{arm} c_p (T_{air}^{tiroir_{i-1}} - T_{air}^{tiroir_i}) \quad (4)$$

La circulation d'air est modélisée entre l'air du local et l'air à l'intérieur de l'armoire électrique à l'aide d'ouvertures horizontales entre chaque tiroir et deux ouvertures latérales pour l'entrée et l'extraction d'air. Il est à souligner que les échanges aérauliques entre les nœuds d'air sont la conséquence d'une différence de pression induite par la différence de température. En effet, l'équation de Bernoulli appliquée à l'écoulement d'air des nœuds d'air A vers B de deux tiroirs superposés est exprimée par :

$$p_A + \rho_A g (z_A - z_{orifice}) = p_B + \rho_B g (z_B - z_{orifice}) + \frac{1}{2} \rho v_B^2 + \Delta P_l \quad (5)$$

ΔP_l représente les pertes de charge. Le débit massique d'air traversant l'orifice inter-tiroir de l'équation (4) est calculé en introduisant un coefficient de décharge C_d et la section d'ouverture S_{ouv} :

$$\dot{m} = \rho C_d S_{ouv} v_B \quad (6)$$

3. Résultats de simulation

3.1. Etude préliminaire

Le Tableau 1 présente les valeurs des principales données d'entrée du modèle. Une première simulation de ce modèle a été réalisée avec un pas de temps de 200 s sur 5000 échantillons. Les valeurs des paramètres de ces modèles sont des valeurs représentatives des cas d'étude dans le local témoin.

Paramètre	T_e	$T_{initiale}$	T_{ext}	n	ε_{emet}	ε_{arm}	ε_{murs}	P_{emet}	C_d	S_{ouv}	S_{arm}
Unité	°C	°C	°C	Vol/h	-	-	-	W	-	m ²	m ²
Valeur	16	20	20	4	0,8	0,8	0,8	250	0,61	0,04	7,2

Tableau 1 : Paramètres principaux du modèle.

La Figure 4 montre l'évolution de différentes températures au sein du local. La température de l'air du local décroît de 0,5 °C durant la première heure (cf. zoom Figure 4). Ceci est dû à la réponse rapide du système de ventilation comparé aux émetteurs à l'intérieur de l'armoire. Ensuite, elle évolue pour atteindre le régime stationnaire en quelques jours (22,3 °C). Les températures de tous les murs verticaux sont identiques. La légère différence entre les températures du plafond et des murs verticaux est due aux deux corrélations différentes utilisées pour estimer h_{cv} . Les températures des murs sont inférieures à celle de l'air du local témoin. En effet, les faces extérieures des murs verticaux et du plafond échangent par convection avec l'air entre enceintes, dont la température est imposée à 20 °C.

L'écart maximal de température entre l'air du local et celui de l'armoire est d'environ 20 °C. La température d'air est importante au niveau des tiroirs supérieurs, ceci est une conséquence de la poussée d'Archimède qui induit un écoulement ascensionnel et donc une accumulation de chaleur dans le dernier tiroir.

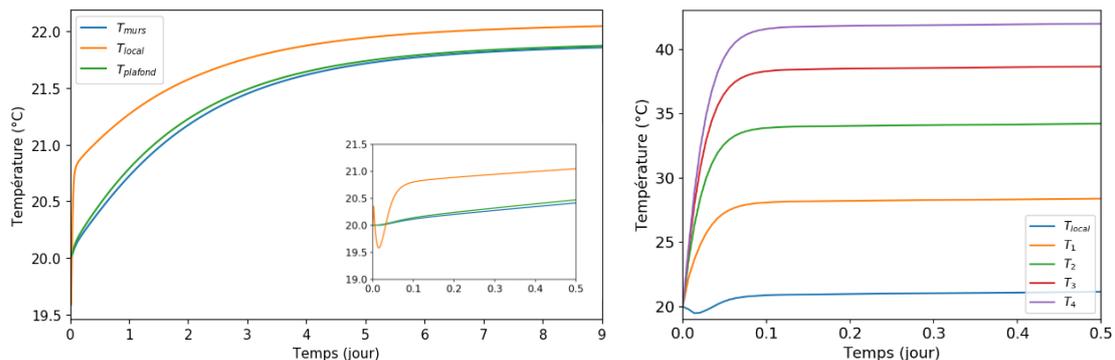


Figure 4 : Evolution des températures au sein du local témoin (à gauche) et des températures d'air à l'intérieur de l'armoire (T_1 - T_4 , du bas vers le haut de l'armoire).

La Figure 5 montre l'évolution de la température d'air du local en fonction du taux de renouvellement d'air assuré par la ventilation. Pour $n = 4$ vol/h, la température d'air est de 22,3 °C en régime stationnaire. L'arrêt de la ventilation, $n = 0$ vol/h, induit une hausse de température de 3 °C. Bien qu'il y ait rupture totale de ventilation, la hausse de température n'est pas prononcée. Cela est dû à la température imposée de l'air entre-enceintes, qui contribue au refroidissement de l'air du local au travers les murs. Enfin, un passage du taux de renouvellement à 11 vol/h provoque une chute brutale de la température d'air du local, passant

ainsi de 25 °C à 21 °C en quelques heures pour se stabiliser à 19,7 °C en l'espace de trois jours. Les températures de l'air à l'intérieur de l'armoire présentent le même comportement que celle de l'air du local.

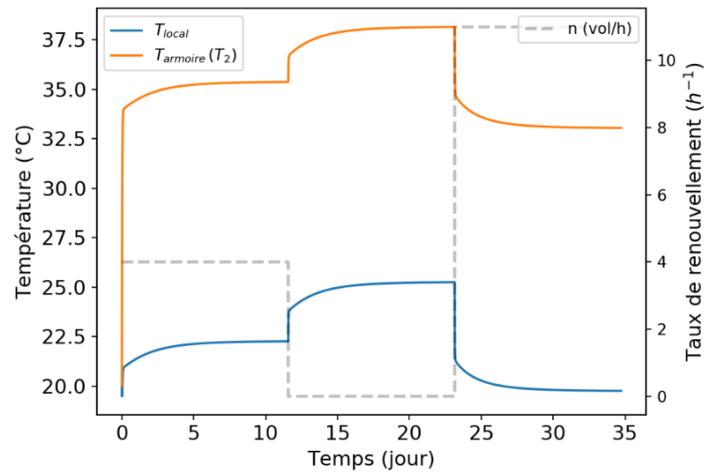


Figure 5 : Température d'air du local en fonction de son taux de renouvellement d'air.

3.2. Etude de sensibilité

3.2.1. Méthodologie

Les analyses de sensibilité sont souvent coûteuses en termes de temps de calcul et de nombre de simulations requis. Ainsi, nous proposons l'application d'une méthode pour réduire considérablement le nombre de simulations nécessaires, comme dans [6]. L'idée principale est de substituer le modèle physique par un méta-modèle à base de « polynômes de chaos » [7]. En utilisant les coefficients de ce polynôme, on peut en déduire facilement les indices de Sobol [8] et les caractéristiques probabilistes des sorties considérées.

Un plan d'expériences de 5000 points est généré aléatoirement, suivant des lois de tirage probabilistes (uniforme $U(a, b)$ ou normale $N(\mu, \sigma^2)$), illustré dans le Tableau 2. Les principaux paramètres intervenant en régime stationnaire ont été sélectionnés comme variables d'entrée. L'évaluation de ce plan permet de récupérer les valeurs des différentes variables de sorties (température d'air des tiroirs inférieur T_1 et supérieur T_4 , température de surface intérieure des murs, température d'air du local) à l'instant $t=11$ jours, correspondant au régime permanent. A partir de ces dernières valeurs, et pour chacune des variables de sortie, un métamodèle par chaos polynomial est construit. Chacun de ces métamodèles est construit en utilisant 80 % des données disponibles, puis validé sur les 20 % restantes. La Figure 6 trace les courbes d'ajustement des échantillons de test pour les variables de sortie d'intérêt. Les métamodèles permettent une excellente prédiction de ces dernières variables ($Q_2 > 0,99$).

Paramètre	Unité	Description	Variation
T_e	°C	Température de soufflage	U [16 – 20]
P_{emet}	W	Puissance d'un émetteur	U [75 – 250]
n	Vol/h	Taux de renouvellement	U [1 – 10]
T_{ext}	°C	Température de l'air entre enceintes	U [20 – 30]
$\varepsilon_{arm}, \varepsilon_{murs}, \varepsilon_{emet}$	-	Emissivité de l'armoire, murs, émetteurs	N [0,8 – 0,08 ²]
H	m	Hauteur du local	N [2,8 – 0,3 ²]
L	m	Longueur du local	N [11 – 1,5 ²]

C_d	-	Coefficient de décharge	N $[0,61 - 0,061^2]$
S_{ouv}	m^2	Section des ouvertures de l'armoire	U $[0,02 - 0,06]$
S_{arm}	m^2	Surface extérieure de l'armoire	N $[7,2 - 0,72^2]$

Tableau 2 : Paramètres d'entrée principaux du modèle.

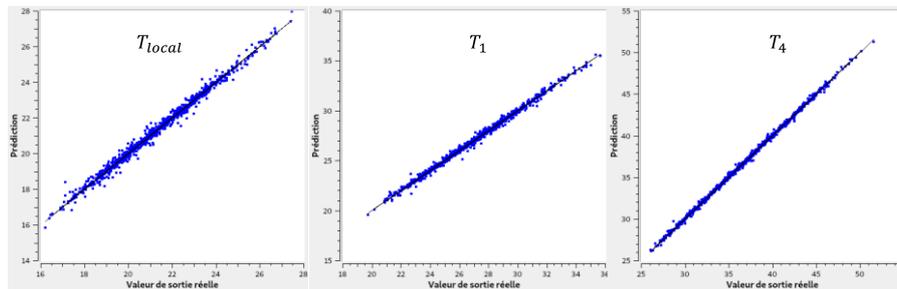


Figure 6 : Courbes d'ajustement des échantillons de test pour les métamodèles.

3.2.2. Indices de Sobol

Une analyse de sensibilité à partir de la méthode de Sobol est effectuée afin de quantifier l'influence de certains paramètres de ce modèle. Les variables de sorties d'intérêt sont la température de l'air à l'intérieur de l'armoire à deux différents niveaux (T_1 et T_4), la température des murs ainsi que la température de l'air dans le local. Les indices de Sobol du premier ordre évaluent l'influence de chaque entrée individuellement sur la variable de sortie, tandis que les indices totaux prennent en compte l'impact des interactions entre les paramètres d'entrée sur la sortie.

Les résultats de ces études de sensibilité sont illustrés sur les Figures 7 et 8. Il est noté une forte sensibilité de la température de l'air du local et du mur à la température de l'air entre enceintes, considérée constante dans ce modèle. Le taux de renouvellement d'air ainsi que la température de soufflage participant à l'évacuation de l'excédent de chaleur représentent des paramètres également influents. Les paramètres géométriques du local ainsi que les émissivités des surfaces n'ont quasiment pas d'impact sur les variables de sorties considérées.

Les températures de l'air à l'intérieur de l'armoire dépendent principalement de la puissance des émetteurs. Cette dernière impacte davantage la température de l'air situé en haut de l'armoire. En effet, la circulation de l'air se faisant du bas vers le haut de l'armoire, l'air se trouvant en partie haute est impacté par les émetteurs situés en bas de l'armoire.

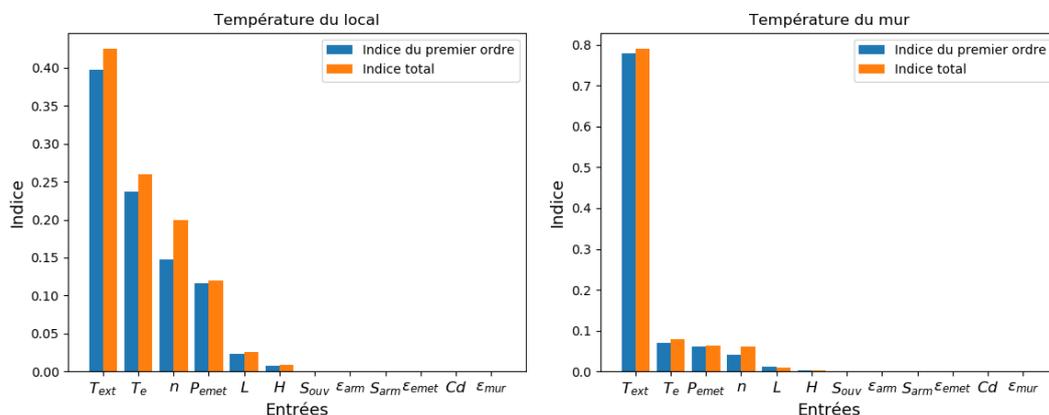


Figure 7 : Indices de Sobol de 1^{er} ordre et d'ordre total sur les températures d'air et mur du local.

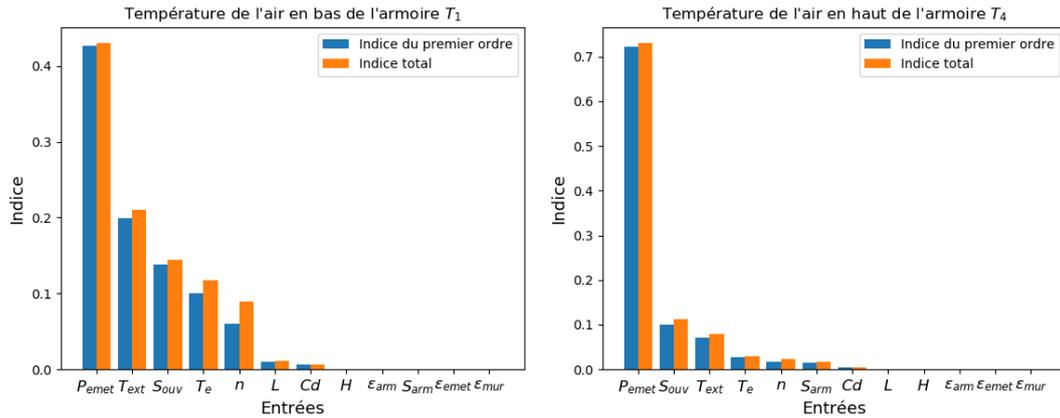


Figure 8 : Indices de Sobol des températures de l'air à l'intérieur de l'armoire.

4. Conclusion

Dans cet article, un modèle thermo-aéraulique représentant un tableau électrique ou une armoire de contrôle-commande implanté dans un local a été proposé. Ce modèle prend en compte les échanges thermiques et aérauliques entre le local témoin et l'armoire électrique. A l'aide de métamodèles permettant la prédiction de certaines variables de sorties, des études de sensibilité ont été menées afin d'évaluer l'influence de certains paramètres d'entrée. Nous avons montré que ce modèle permet une estimation rapide des grandeurs thermo-aérauliques sur de longues durées. L'objectif final est d'évaluer ces grandeurs pour des diverses conditions limites instationnaires. La phase suivante de notre démarche concernera la validation de ce modèle à l'aide de données expérimentales qui seront acquises dans le local témoin actuellement en phase finale d'instrumentation.

Références

- [1] C. Gao, Z. Yu, J. Wu, Investigation of airflow pattern of a typical data center by CFD Simulation, Energy Procedia, 78. 2687-2693, (2015).
- [2] Y. Kaced, Études du refroidissement par free cooling indirect d'un bâtiment exothermique application au centre de données, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, (2018).
- [3] M. Iyengaret, R Schmidt, Analytical modeling of energy consumption and thermal performance of data center cooling systems: from the chip to the environment, thermal engineering heat transfer summer conference, American Society of Mechanical Engineers, p. 877–86, (2007)
- [4] ASHRAE Fundamentals – Chapter 1 to 19 – 200.
- [5] Joseph A. Carroll, An « MRT method » of computing radiant energy exchange in rooms, Systems Simulation and Economic Analysis Conference, San Diego CA, (1980).
- [6] R. Merheb, L. Mora, E. Palomo, Une surface de réponse à base de polynômes de chaos pour l'analyse des incertitudes à l'échelle du bâtiment, Conférence IBPSA (2014).
- [7] B. Sudret, Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions, Reliability Engineering & System Safety, 93. 464-979 (2008).
- [8] Sobol, I.M, Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models, Mathematical Modelling and Computational Experiments, 4, 407-414 (1993).
- [9] M. Baudin, A. Dutfoy, B. Iooss, A.L. Popelin, Openturns: An industrial software for uncertainty quantification in simulation. In Handbook of uncertainty quantification. Springer, 2001–2038, (2017).