

La simulation thermique dynamique à l'épreuve des grands navires à passagers

Antoine Gautier^{*1}, Benoît Cogné^{*2}, Dominique Bodet^{*2}, Thomas Hervouet^{*3},
Olivier Boisseau^{*3}

¹ Solamen

4 rue Guépin. F-44000 Nantes

*antoine.gautier@solamen.fr

² Cofely Axima

46 boulevard Prairie au Duc BP 40119. F-44201 Nantes CEDEX 2

*benoit.cogne@cofelyaxima-gdfsuez.com, dominique.bodet@cofelyaxima-gdfsuez.com

³ STX Europe

Avenue Antoine Bourdelle BP 90180. F-44613 Saint-Nazaire CEDEX

*thomas.hervouet@stxeurope.com, olivier.boisseau@stxeurope.com

RESUME. Le projet Climat+ a permis le développement d'une méthode générique de calcul des consommations d'énergie des systèmes CVC équipant les navires à passagers. Cette méthode est fondée sur l'utilisation du code de simulation TRNSYS et sur les développements réalisés par Cofely Axima et Solamen.

Cet article rend compte des travaux de validation de la méthode par comparaison à des données de mesure acquises durant une semaine d'exploitation normale d'un navire en Méditerranée. Avant tout calibrage le modèle affiche de très bonnes performances, les écarts calcul mesure sur les consommations étant inférieurs à 10% quel que soit le poste étudié.

MOTS-CLEFS. Simulation thermique dynamique, systèmes CVC, navires passagers, comparaison calcul mesure, calibrage

1 INTRODUCTION

Le projet Climat+ a permis le développement d'une méthode générique de calcul des consommations d'énergie des systèmes CVC équipant les navires à passagers. Cette méthode est fondée sur l'utilisation du code de simulation TRNSYS (SEL et al., 2012) et sur les développements réalisés par Cofely Axima et Solamen.

Cet article rend compte des travaux de validation de la méthode par comparaison à des données de mesure acquises durant une semaine d'exploitation normale d'un navire en Méditerranée.

Il aborde les aspects liés à la modélisation, puis ceux ayant trait à la mesure et présente finalement les résultats de la validation et les apports du calibrage du modèle.

2 OBJET D'ÉTUDE

Le navire, exploité par un grand armateur européen, mesure 333 m de long pour 68 m de haut et affiche une capacité de 4345 passagers (1751 cabines). Une tranche parmi les huit composant le navire a été retenue comme objet d'étude. La tranche choisie comporte une quinzaine de locaux publics, 300 cabines passagers, 5 cuisines et une cage d'escaliers. Les paramètres dimensionnels des systèmes de la tranche sont présentés au tableau 1.

	Puissance froid [kW]	Débit de soufflage [m3/h]
Total	4866	345790
Public	55%	55%
Cabines	19%	22%
Cuisines	22%	19%
Escaliers	3%	4%

TABLEAU 1: Valeurs nominales de la puissance froid et du débit de soufflage et répartition par type de système

3 PROCESSUS DE MODÉLISATION

3.1 DESCRIPTION FONCTIONNELLE

Les principes fonctionnels régissant le fonctionnement des installations CVC sont passés en revue et représentés sous forme de schémas fonctionnels détaillés. Ce travail préparatoire peut sembler anecdotique voire redondant vis-à-vis des études CVC et GTC. Notre expérience nous montre qu'il n'est en fait jamais superflu et qu'il est même souvent crucial. Il constitue en outre un point de validation important avec les équipes de conception avant le travail de modélisation proprement dit.

Sans rentrer dans le détail du fonctionnement des installations, précisons que les cabines sont traitées par des systèmes tout air neuf avec roue enthalpique et boîtes terminales à débit variable et réchauffage électrique, les locaux publics par des systèmes tout air à recyclage et débit variable, les cuisines par des systèmes tout air neuf à débit variable. Les batteries à eau sont équipées de vannes trois voies, les pompes de circulation fonctionnent à vitesse constante, les groupes de production d'eau glacée sont régulés en puissance sur la température de retour.

3.2 ZONAGE

Les locaux sont regroupés au sein de zones thermiques homogènes en température et en humidité. Les critères de regroupement usuels sont considérés : similitude des systèmes de traitement, des apports internes et des caractéristiques régissant le couplage avec l'extérieur.

Par ailleurs les systèmes de caractéristiques identiques desservant des locaux aux profils de charges analogues sont représentés par un seul "macro-système". Les grandeurs extensives caractérisant les systèmes regroupés sont sommées pour paramétrer le macro-système. La détermination des autres paramètres (rendement, hauteur manométrique des ventilateurs, etc.) est fondée sur l'équivalence des puissances au point de fonctionnement nominal.

Ces règles conduisent à distinguer à l'échelle de la tranche 14 macro-systèmes et 23 zones thermiques, l'essentiel des regroupements étant opéré sur les locaux et systèmes cabines.

Remarque : Le regroupement des systèmes repose sur une hypothèse d'additivité des débits d'air qui constitue une approximation forte vis-à-vis du calcul de la hauteur manométrique des ventilateurs (et donc de la puissance électrique absorbée) du fait de la non linéarité des pertes de charge en fonction du débit. Dans le cas général cette hypothèse entraîne en régime varié un biais systématique dans le sens d'une sous-estimation de la consommation électrique des ventilateurs. Cette sous-estimation est de l'ordre de la quantité $(x_1 - x_2)^2$ dans le cas de deux systèmes élémentaires de même débit nominal regroupés au sein d'un même macro-système, x_1 et x_2 représentant les fractions de débit nominal des systèmes élémentaires.

3.3 SYSTÈMES CVC

La modélisation est centrée sur les systèmes secondaires, les systèmes de production étant représentés de manière simplifiée via des régulateurs ou des conditions limites imposées.

Les modèles utilisés pour représenter les différents composants des installations CVC ont été développés par Cofely Axima à partir de sources bibliographiques variées : (O. Morisot, D. Marchio, 1999), (LBNL, 2013), (M.J. Brandemuehl, 1993), etc. Les algorithmes ont été sélectionnés et enrichis pour répondre à l'objectif de calcul précis des consommations d'énergie sous TRNSYS dans le contexte spécifique de l'étude des installations CVC. Ainsi les principes de modélisation suivants ont été mis en œuvre.

- Le paramétrage des modèles ne nécessite pas la connaissance des caractéristiques physiques détaillées du composant mais celle de son comportement en un point de fonctionnement. Les données études des fournisseurs peuvent donc être directement utilisées.
- Les boucles de régulation suffisamment simples (p.ex. la régulation de la température de soufflage d'une centrale de traitement d'air par action sur les vannes des batteries) sont représentées selon un schéma indirect dans lequel les valeurs des grandeurs réglantes sont calculées itérativement pour amener les grandeurs réglées aux valeurs de consigne (dans la limite de capacité des systèmes). Cela évite le recours à des modèles de régulateur PI et les instabilités de régulation associées, typiquement difficiles à maîtriser en simulation pour des pas de temps de l'ordre du quart d'heure.
- Le modèle de représentation de la chaîne énergétique des ventilateurs (convertisseur de fréquence → moteur → transmission → ventilateur) a lui aussi été conçu selon un schéma indirect : en fonction du débit et de la hauteur manométrique fournis en entrée, le modèle calcule la vitesse de rotation et le rendement à partir des courbes caractéristiques du ventilateur dans le domaine des coefficients adimensionnels de Rateau.

3.4 AÉRAULIQUE

La pratique usuelle consiste à approximer les lois de variation du point de fonctionnement ($\dot{V}, \Delta P$) des ventilateurs par une étude aéraulique préalable et à calculer sur cette base la puissance électrique absorbée à l'aide du modèle performantiel décrit ci-dessus. Cette pratique a été mise en œuvre et est désignée par la suite "modélisation aéraulique simplifiée".

Toutefois les spécificités de la distribution d'air dans les navires ont conduit à envisager un niveau de modélisation plus détaillé. En effet les centrales de traitement d'air sont ici raccordées à des réseaux communs de prise et rejet d'air. Il y a donc un couplage aéraulique des systèmes entre eux i.e. une interdépendance des points de fonctionnement des ventilateurs. Ce couplage est suspecté influencer au premier ordre sur le taux d'air neuf des centrales à recyclage et donc sur la puissance de refroidissement. Un modèle aéraulique détaillé a ainsi été développé, représentant chaque configuration de réseau rencontrée ainsi que le ventilateur associé et permettant une résolution couplée en débit et en pression.

Pour la résolution locale à l'échelle de chaque système, un solveur générique de systèmes algébriques non linéaires – implémentation d'une version modifiée de la méthode de Powell (B.S. Garbow et al., 1980) – est utilisé. Pour la résolution globale à l'échelle des réseaux communs de prise et rejet d'air, le solveur de TRNSYS est exploité. Le modèle est paramétré avec les coefficients de perte de charge de chaque branche du réseau, calculés à partir des mesures de débit et de pression effectuées lors des essais de mise en service.

Des effets significatifs sur le taux d'air neuf (jusqu'à une diminution de moitié) sont effectivement mis en évidence sur la base de simulations à l'année ; ils apparaissent toutefois très disparates d'un système à l'autre cf. figure 1. En outre ces effets se compensent sur l'ensemble des systèmes de la tranche et l'impact sur les consommations d'énergie à l'année est seulement de l'ordre du pour-cent quel que soit le poste étudié. Ces conclusions ont permis de valider le bien-fondé de la modélisation aéraulique simplifiée dans le cadre d'analyses énergétiques à l'échelle d'une tranche ou d'un navire.

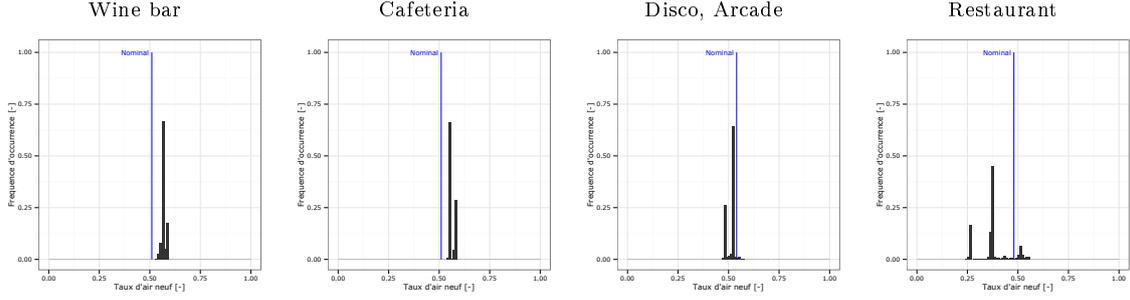


FIGURE 1. Distribution annuelle des taux d'air neuf – Modélisation aéraulique détaillée

4 MESURE

4.1 PLAN DE MESURE

Le plan de mesure mis en œuvre est présenté au tableau 2. Il a été déployé avec l'aide de STX et de l'armateur durant une semaine d'exploitation normale du navire en Méditerranée, au cours des mois de juin et juillet 2013.

La puissance échangée sur le réseau d'eau glacée de la tranche est reconstruite à partir des mesures de débit et des températures de départ et de retour : $\dot{Q} = \dot{V}_{EG}^{Mes} \cdot \rho \cdot Cp \cdot (T_{EG,Ret}^{Mes} - T_{EG,Dep}^{Mes})$.

- Le débit est mesuré ponctuellement à l'aide d'un débitmètre à ultrasons utilisé en mode réflexion i.e. avec les sondes positionnées du même côté de la conduite. Chaque mesure est le résultat d'une moyenne sur 60 s.
- Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples appairés installés au contact de la conduite, sous le calorifuge.

La puissance thermique transmise au local restaurant par les systèmes CVC est reconstruite à partir des mesures de pression statique en gaine et des températures au soufflage et en ambiance :

$$\dot{Q} = \dot{V}_{Nom}^{Essai} \cdot \sqrt{\frac{P^{Mes}}{P_{Nom}^{Essai}}} \cdot \rho \cdot Cp \cdot (T_{Sfl}^{Mes} - T_{Amb}^{Mes}).$$

Les mesures d'irradiance sont réalisées ponctuellement à l'aide d'un pyranomètre et utilisées pour recalibrer un modèle de ciel clair. La composante diffuse est estimée en protégeant manuellement le capteur du rayonnement direct.

4.2 INCERTITUDE DE MESURE

Les incertitudes de mesure (incertitudes types) sont évaluées sur les grandeurs observées à l'échelle de la tranche. Aucun biais de mesure significatif n'est révélé par cette analyse.

PUISSANCE THERMIQUE EAU GLACÉE L'incertitude sur la puissance eau glacée est évaluée en considérant indépendantes les mesures de débit et de température.

$$\begin{aligned} u_{Total}(Q) &= \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)^2 u^2(V) + \left(\frac{\partial Q}{\partial \Delta T}\right)^2 u^2(\Delta T)} \\ &= \frac{\rho \cdot Cp}{3600} \sqrt{\Delta T^2 u^2(V) + V^2 u^2(\Delta T)} \end{aligned}$$

L'incertitude sur le débit est d'abord calculée comme l'écart type empirique de la moyenne des 9 mesures réalisées (AFNOR, 1999). Ce calcul fournissant un résultat inférieur à l'incertitude de mesure du certificat d'étalonnage (3%), celle-ci est utilisée par précaution.

Niveau	Catégorie	Grandeur	Source	Période
Tous	Données climatiques ext.	Température	Supervision	5'
		Humidité relative	Supervision	5'
		Irradiance totale sur le plan horizontal	Capteur	2h
		Irradiance diffuse sur le plan horizontal	Capteur	2h
Restaurant	Enveloppe	Dimensions et conditions de propreté des baies	Relevé visuel	5'
	Données climatiques int.	Température (12 points)	Capteur	5'
		Occupation	Relevé visuel	Chaque trans ^e
	Apports internes	Puissance active éclairage	Capteur	5'
		HVAC	Points de consigne (température et [CO2])	Supervision
	Température de reprise		Supervision	5'
	[CO2] reprise		Supervision	5'
	Température de soufflage par zone (4 points)		Capteur	5'
		Pression statique au soufflage (2 points)	Capteur	5'
Tranche 6	Apports internes	Occupation nominale des cabines	Armateur	-
		Signal keycard in place de chaque cabine	Supervision	5'
		Occupation par local public	Relevé visuel	Chaque trans ^e
	HVAC (tous systèmes)	Points de consigne	Supervision	5'
		Fréquence Min et Max convertisseurs	Relevé visuel	-
		Signal de commande des ventilateurs	Supervision	5'
		Débit volumique EG départ tranche	Capteur	-
		Température EG départ tranche	Capteur	5'
		Température EG retour tranche	Capteur	5'
		Puissance active convertisseurs (niveau MRPV)	Capteur	5'
		Puissance active totale tranche	Supervision	5'
		Signal de commande réchauffeur électrique cabines	Supervision	5'

TABLEAU 2: Plan de mesure

L'incertitude sur l'écart de température est évaluée à partir du cumul quadratique de l'incertitude capteur (pour deux capteurs appairés : $u_{Mes}(\Delta T) = (U_{Mes}(T) \cdot \bar{T}) \sqrt{2 - 2 \cdot r(T_{Ret}, T_{Dep})}$) et de l'incertitude du dispositif de mesure (prise égale au quantile à 68% d'une loi uniforme d'étendue égale à la valeur maximale du biais, estimée analytiquement à moins de 0.1°C par un calcul des températures à l'interface isolant / conduite).

$$u(\Delta T) = \sqrt{u_{Mes}^2(\Delta T) + (Biais_{(68\%)})^2} = \sqrt{0.15^2 + (68\% * 0.08)^2} = 0.16 \text{ [C]}$$

L'incertitude totale sur la mesure de la puissance eau glacée est donc évaluée à :

$$U_{Total}(Q) = u_{Total}(Q)/\bar{Q} = \frac{998 * 4.186}{3600} \sqrt{2.4^2 * 11.5^2 + 383^2 * 0.16^2} / 1050 = 7.2\%$$

PUISSANCE ÉLECTRIQUE DES VENTILATEURS La puissance électrique des ventilateurs est mesurée à l'aide d'enregistreurs de puissance installés au niveau des 3 tableaux principaux de la tranche. L'incertitude de chaque appareil est inférieure à 1%, incertitude des capteurs de courant exclue. La valeur en référence (ASHRAE, 2002) est utilisée pour représenter l'incertitude totale de chaque mesure de puissance (incluant l'incertitude capteur) soit 2%. L'incertitude sur la puissance totale est donc :

$$U_{Total}(P_{Vent}) = \sqrt{\sum_i \cdot (U_{Mes}(P_{Vent,i}) \cdot \bar{P}_{Vent,i})^2} / \bar{P}_{Vent} = \sqrt{3 * (0.02 * 100)^2} / 300 = 1.1\%$$

PUISSANCE ÉLECTRIQUE DES RÉCHAUFFEURS CABINES La puissance électrique des réchauffeurs électriques n'est pas mesurée à proprement parler : elle est reconstruite à partir des signaux de contrôle des réchauffeurs enregistrés par la supervision et des puissances nominales des réchauffeurs. L'incertitude de mesure associée est donc plutôt une mesure de la précision de la chaîne de régulation de puissance des boîtes. En l'absence d'information, une valeur forfaitaire

de 10% est considérée. L'incertitude sur la puissance totale est donc :

$$\begin{aligned} U_{Total}(P_{Reh}) &= \sqrt{\sum_i \cdot (U_{Mes}(P_{Reh,i}) \cdot \bar{P}_{Reh,i})^2 / \bar{P}_{Reh}} u_{Total}(P_{Reh}) \\ &= \sqrt{300 * (0.10 * 0.25)^2 / 76} = 0.6\% \end{aligned}$$

5 COMPARAISON CALCUL MESURE

5.1 MÉTHODOLOGIE

L'analyse statistique des écarts calcul mesure est réalisée selon les spécifications du Guideline 14 (ASHRAE, 2002). Les concepts utilisés sont illustrés de manière simplifiée à la figure 3 qui représente l'évolution des puissances calculée (y) et mesurée (o) en fonction du temps et la distribution associée des écarts calcul mesure. La composante systématique MBE (biais induisant un écart sur les consommations) et la composante aléatoire $s(o-y)$ de l'incertitude de modélisation $RMSE$ y sont mises en évidence.

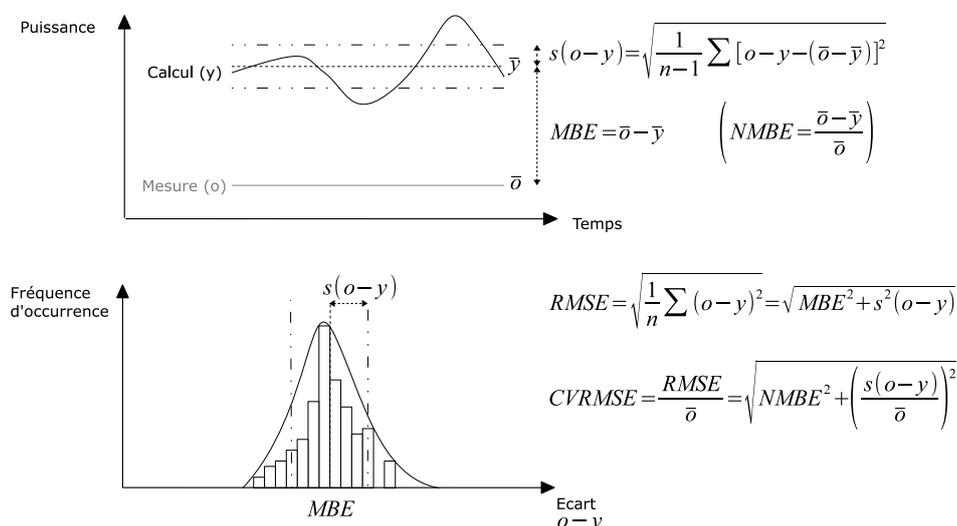


TABLEAU 3: Représentation schématique des composantes de l'incertitude de modélisation

5.2 NIVEAU TRANCHE

La figure 2 présente les profils des puissances calculées et mesurées (au pas de temps de 15') pour les trois postes étudiés à l'échelle de la tranche. Le tableau 4 présente les statistiques associées sur les écarts calcul mesure.

Poste	Avant calibrage		Après calibrage	
	Incertitude $CVRMSE$ [-]	dont biais systématique $NMBE$ [-]	Incertitude $CVRMSE$ [-]	dont biais systématique $NMBE$ [-]
Puissance thermique eau glacée	11.2%	-5.8%	11.1%	-2.9%
Puissance électrique ventilateurs	8.9%	3.9%	9.8%	2.3%
Puissance électrique réchauffeurs cabines	23.5%	-8.9%	21%	-0.2%

TABLEAU 4: Précision du modèle à l'échelle de la tranche

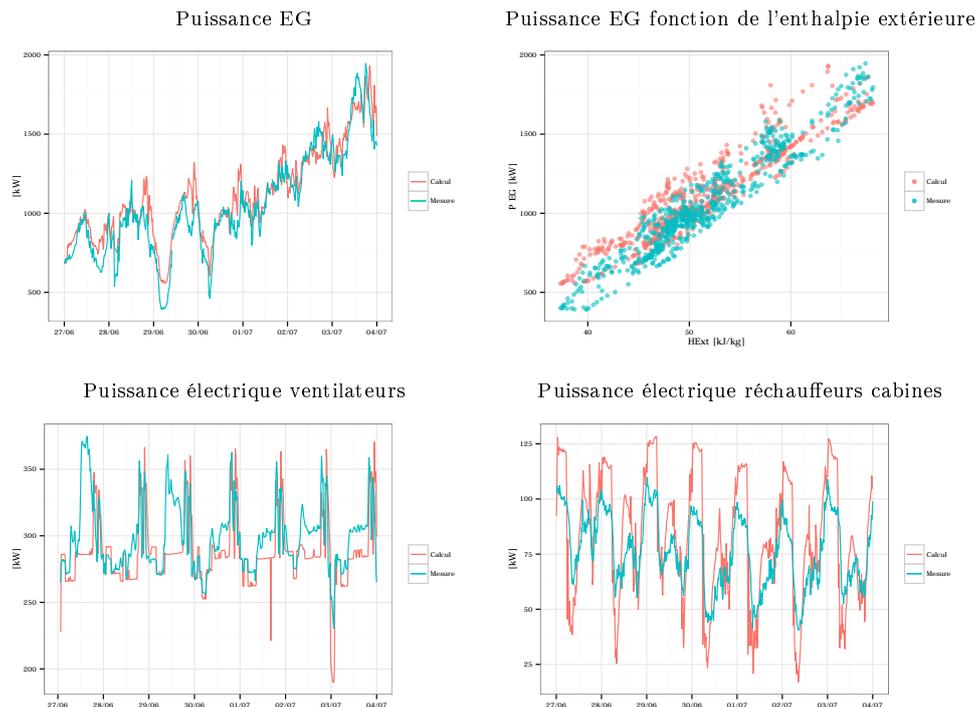


FIGURE 2. Comparaison des puissances calculées (avant calibrage) et mesurées (pas de temps 15')

Même avant calibrage le modèle satisfait les critères formulés par l'ASHRAE pour l'utilisation de la simulation calibrée dans un objectif de quantification des économies d'énergie soit $\pm 30\%$ pour $CVRMSE$ et $\pm 10\%$ pour $NMBE$ (ASHRAE, 2002). Les biais évalués sur les puissances représentent exactement les écarts calcul mesure sur les consommations d'énergie sur la semaine de campagne, qui sont donc inférieurs à 10% pour tous les postes étudiés. Aucun biais de mesure significatif n'ayant été détecté sur les mesures de puissance effectuées à l'échelle de la tranche, l'écart calcul mesure sur les consommations $NMBE$ est assimilable à une incertitude totale.

Seule la consommation électrique des ventilateurs est légèrement sous-estimée, les autres postes étant plutôt représentés de manière pénalisante par le modèle. Les principales sources de conservatisme identifiées sont les suivantes.

- Eau glacée : tendance à la sur-estimation du taux d'air neuf par la modélisation aéraulique simplifiée
- Réchauffeurs cabines : non prise en compte d'un automatisme de fonctionnement réduit qui implique en pratique une mise hors service des réchauffeurs à l'ouverture des baies

Le facteur identifié comme le plus critique vis-à-vis de la précision est le "niveau de couplage des systèmes aux locaux" : si le fonctionnement moyen des systèmes dépend fortement du besoin dans les locaux, les incertitudes sur les charges internes (difficilement réductibles) tendent en effet à se propager sur les puissances calculées. C'est notamment ce qui explique l'incertitude plus élevée sur les puissances des réchauffeurs cabines, sur lesquelles les effets de couplage avec les locaux influent au premier ordre.

Bien que les statistiques obtenues ne requièrent pas de travail d'ajustement du modèle sur les mesures, une méthode de calibrage a toutefois été expérimentée.

Seuls les paramètres pour lesquels un effet significatif a été détecté par analyse de sensibilité sont ajustés – dans les limites fixées par les incertitudes estimées sur ces paramètres : facteur d'utilisation nocturne des équipements électriques dans les cabines, augmentation de température

en gaine nominale pour les systèmes cabines, taux de fuite en gaine nominal tous systèmes, occupation des locaux publics sur plages de soirée, température de consigne des locaux publics et escaliers, taux d'air neuf des systèmes locaux publics et escaliers.

Le programme GenOpt (M. Wetter, 2011) est utilisé en couplage à TRNSYS pour rechercher l'ajustement optimal. L'optimisation est réalisée avec l'algorithme GPS Hooke-Jeeves et l'objectif de minimiser la moyenne des écarts calcul mesure (MBE) sur les trois postes étudiés cf. colonne "Après calibrage" du tableau 4.

Le calibrage des paramètres statiques du modèle apparaît ainsi comme un levier efficace pour résorber le biais sur les puissances i.e. l'écart sur les consommations. Il a toutefois un effet limité sur l'incertitude totale de modélisation (représentant les écarts instantanés sur les puissances).

5.3 NIVEAU LOCAL (RESTAURANT)

L'analyse des mesures de pression et de température au soufflage a révélé de fortes instabilités de régulation, le réglage des systèmes en service régulier n'ayant pas encore été réalisé au moment de la campagne. Ces instabilités ont rendu impossible toute comparaison au calcul sur des pas de temps réduits. Les statistiques sont donc établies sur des grandeurs intégrées à la journée (cas "Avant calibrage" du tableau 5) et l'analyse graphique est réalisée sur un profil moyenné sur la semaine de campagne (cas "Avant calibrage" de la figure 3 qui présente également les apports calculés).

Deux sources d'incertitude dominantes apparaissent expliquer les écarts entre les puissances calculées et mesurées : les horaires d'occupation en soirée (seulement deux horaires sont relevés par le personnel d'équipage correspondant au début de chaque service) et la puissance métabolique (une valeur de $75 \text{ W(sens)}/p$ est considérée par défaut, en cohérence avec les études de conception). Le calibrage du modèle consiste en un ajustement manuel de ces deux paramètres : l'horaire de fin du 2^e service du soir est ajusté pour minimiser l'écart calcul mesure sur les profils de $[\text{CO}_2]$ – cas "OccPlage" du tableau 5 – et la puissance métabolique est augmentée de $15 \text{ W}/p$ pour prendre en compte la dissipation plus importante à 22°C (température moyenne observée) qu'à 24°C (température utilisée par défaut pour le paramétrage de la puissance métabolique) – cas "Meta" du tableau 5.

Cas	$CVRMSE \left(\int_j P \right) [-]$	$NMBE \left(\int_j P \right) [-]$	$NMBE (P) [-]$
Avant calibrage	-12.8%	-7.4%	-7.8%
OccPlage	-11.0%	-1.1%	-1.2%
OccPlage & Meta	-14.7%	-9.6%	-9.7%

TABLEAU 5: Précision du modèle à l'échelle du local restaurant

L'ajustement de l'horaire de fin du 2^e service a un effet significatif sur le biais moyen, ramené à moins de 2% (sur les valeurs journalières et instantanées).

L'effet de l'ajustement complémentaire de la puissance métabolique est très mal rendu par les statistiques du fait d'un décalage résiduel des plages d'occupation en soirée. L'augmentation significative du biais est en effet due en grande partie à la sur-estimation des puissances calculées sur les pas de temps où l'occupation du modèle est manifestement supérieure à l'occupation réelle. La meilleure adéquation des puissances extrêmes entre le calcul et la mesure échappe ainsi à l'analyse statistique alors qu'elle est manifeste avec une représentation graphique (cas "Après calibrage" de la figure 3).

Cette observation est intéressante dans la perspective d'une réflexion sur une méthode de calibrage "automatique". Il semble en effet difficile de fonder le calibrage d'un modèle dynamique sur un objectif de minimisation d'un ensemble de statistiques sur les écarts calcul mesure. A tout le moins une statistique sur les puissances extrêmes journalières devrait être contrôlée. L'analyse graphique nous semble a posteriori hautement souhaitable, ce qui rejoint d'ailleurs les préconisations du Guideline 14 (ASHRAE, 2002).

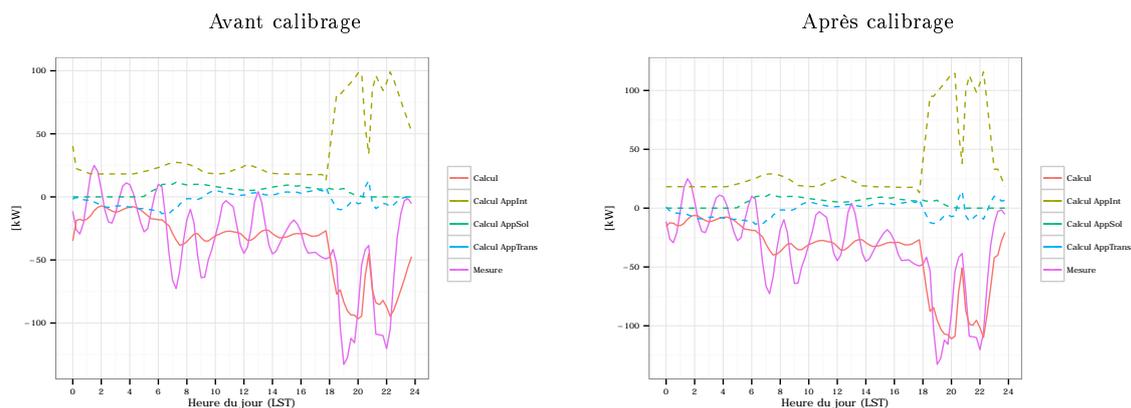


FIGURE 3. Puissance thermique transmise au local restaurant par le système CVC

6 CONCLUSION

La comparaison calcul mesure atteste la performance des outils et méthodes développés en vue d'un calcul précis des consommations d'énergie des systèmes CVC équipant les navires à passagers. Les écarts calcul mesure sur les consommations d'énergie au cours d'une semaine d'exploitation normale du navire sont inférieurs à 10% quel que soit le poste étudié.

Suite à cette validation plusieurs études ont pu être réalisées, tirant notamment parti des capacités de représentation détaillée de TRNSYS – des puissances systèmes mais aussi des conditions d'ambiance dans les locaux : impact d'une réduction des marges de dimensionnement sur la production d'eau glacée ou les batteries froides, test d'un automatisme de délestage de la charge sur le réseau d'eau glacée, analyse coût-bénéfice de variantes fonctionnelles, optimisation du paramétrage des systèmes (loi de régulation en boucle ouverte), etc. Un encapsulage du modèle détaillé dans une application distribuée a notamment été testé avec succès. L'outil développé inclut un paramétrage automatique à partir d'un calcul de dimensionnement intégré et procure une aide à la conception et à l'exploitation auprès d'utilisateurs non spécialistes de la simulation.

RÉFÉRENCES

- AFNOR (1999). Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. NF ENV 13005.
- ASHRAE (2002). Measurement of Energy and Demand Savings. Guideline 14-2002.
- B.S. Garbow et al. (1980). Minpack Project.
- LBNL (2013). EnergyPlus Engineering Reference. University of California.
- M. Wetter (2011). GenOpt – Generic Optimization Program. User Manual. Version 3.1.0. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- M.J. Brandemuehl (1993). HVAC 2 Toolkit – Algorithms and Subroutines for Secondary HVAC System Energy Calculations. ASHRAE.
- O. Morisot, D. Marchio (1999). ConsoClim : Cahier des algorithmes. Réf. 99079R. Ecole des Mines de Paris, Centre d'Énergétique.
- SEL, Transsolar, CSTB, et TESS (2012). TRNSYS 17. A Transient System Simulation Program. Documentation.