

# Développer une ingénierie guidée par



**Cap sur la modélisation des systèmes ! Cet article, rédigé par les ingénieurs du bureau d'études Solamen, de l'entreprise de génie climatique Cofely Axima, groupe GDF SUEZ, et du chantier de construction navale STX France, présente une démarche de recherche et développement menée en marge de la construction d'un navire de croisière sur les chantiers STX de Saint-Nazaire. Son principal intérêt porte sur l'analyse fine des systèmes HVAC afin d'en améliorer la performance fonctionnelle et énergétique. Cette expérimentation pointue sur un ouvrage original permet d'appréhender plus finement les comportements rencontrés en bâtiment.**

Par Antoine Gautier, directeur général de Solamen, Benoît Cogné et Dominique Bodet – Cofely Axima –, Olivier Boisseau et Thomas Hervouet – STX France

Figure 1. Une tranche parmi les huit composant le navire a été étudiée.

La modélisation et la simulation numérique ont connu dans le domaine du bâtiment un essor considérable ces dix dernières années avec le développement généralisé de la maîtrise de l'énergie dans ce secteur. Pour estimer les consommations d'énergie, la variété des états du système couplé - climat, bâtiment, équipements, occupants - doit être représentée. Cela rompt avec l'approche «en puissance» utilisée pour le dimensionnement et ne nécessitant qu'une connaissance des situations extrêmes de fonctionnement. Ce changement de paradigme s'est toutefois opéré en partie seulement. En effet, c'est surtout la conception de l'enveloppe

(spécification et distribution des ouvertures, accès aux masses thermiques, etc.) qui tire aujourd'hui parti des apports de la simulation numérique. L'analyse est principalement menée dans le domaine des températures et des besoins. La conversion des besoins en consommations est faite de manière simplifiée, sur la base d'une représentation très fruste des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) et, le plus souvent, de rendements saisonniers. Les limites de ce type de calcul sont manifestes dans un contexte d'optimisation du coût global ou de contractualisation sur la performance. En réalité, elles concernent déjà les grands choix de conception. Par exem-

ple, l'impact effectif d'une variation des besoins de refroidissement ne peut être estimé qu'en intégrant les capacités de free-cooling de l'installation et le calcul précis des consommations électriques des circulateurs.

L'approche présentée dans cet article bouscule radicalement ces limites en couplant à un modèle zonal standard du bâtiment un modèle détaillé des systèmes CVC, représentant fidèlement les principes fonctionnels et paramétré à partir des spécifications fournisseurs. Outre la faisabilité et la précision de cette démarche, les premiers retours d'expérience ont montré un champ d'application bien plus étendu que celui de l'approche fondée sur une modélisation simplifiée des systèmes. Et parmi les multiples externalités positives, une en particulier mérite d'être mentionnée : l'exploration numérique permet en effet

# rie des systèmes CVC la simulation

d'accéder à une connaissance proprement inédite du fonctionnement des systèmes, d'une part, et des facteurs expliquant les consommations d'énergie, d'autre part. Il y a donc un gain significatif à attendre au niveau de la robustesse et de l'efficacité des installations.

## 1 - Cas d'étude

Les premiers travaux de validation de la méthode développée ont été menés sur un type de bâtiment bien particulier où les effets systèmes prédominent devant les effets d'enveloppe. Il s'agit d'un des plus grands navires à passagers jamais construits ; il a ainsi été retenu comme objet d'étude (**figure 1**). Ce bâtiment mesure plus de 300 m de long et environ 70 m de haut pour une capacité dépassant 4 000 passagers. Une tranche, parmi les huit composant le navire, a été étudiée ; elle 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 [m <sup>3</sup> /h]
Total	4 866	345 790
Public	55 %	55 %
Cabines	19 %	22 %
Cuisines	22 %	19 %
Escaliers	3 %	4 %

Valeurs nominales de la puissance froid et du débit de soufflage et répartition par type de système pour la tranche étudiée.

## 2 - Processus de modélisation

**Description et validation fonctionnelle**  
A la base du processus de modélisation, une description fonctionnelle détaillée est produite pour chaque type de système. L'objectif est de parvenir à une représentation exhaustive des fonctions CVC sous la forme de schémas fonctionnels (**figure 2**). Ensuite, le travail de modélisation ne consiste plus qu'en une transcription mathématique de ces schémas.

Ce travail préparatoire peut sembler anodin, voire redondant vis-à-vis des études d'exécution. Notre expérience nous montre qu'il n'est en fait jamais superflu et qu'il est même souvent critique. Notamment nous n'avons jamais pu appuyer uniquement sur la documentation technique et nous passer d'un interlocuteur connaissant les installations dans le détail. Cela fait d'ailleurs apparaître un axe d'amélioration majeur dans le processus de réalisation, à l'interface entre la conception CVC (peu aboutie en termes de spécifications du contrôle commande) et la conception de la gestion technique de bâtiment (GTC), manquant de visibilité sur les grandes fonctions CVC.

Une validation de chaque fonction CVC est ensuite effectuée via une série de tests élémentaires consistant à perturber les points de consigne ou à enclencher les automatismes, puis à observer les effets sur les grandeurs réglées.

## 3 - Outils de modélisation

L'intégralité des développements est réalisée sous Trnsys (Transient system simulation) [1], un environnement de simulation dédié à l'étude des systèmes énergétiques et intégrant un modèle thermique dynamique de bâtiment. Les travaux réalisés ces dernières années par Cofely Axima, en étroite collaboration avec Solamen, ont abouti à une bibliothèque de composants permettant de modéliser avec précision la plupart des systèmes et phénomènes déterminant les conditions ambiantes et les consommations d'énergie d'un bâtiment :

- les systèmes primaires : chaudière, systèmes thermodynamiques (modèles performantiels) ;
- les systèmes secondaires élémentaires ou packagés : pompe et réseau de dis-

[1] SEL and TESS and CSTB and Transsolar. TRNSYS 17. A Transient System Simulation Program. Documentation, 2012.

Figure 2

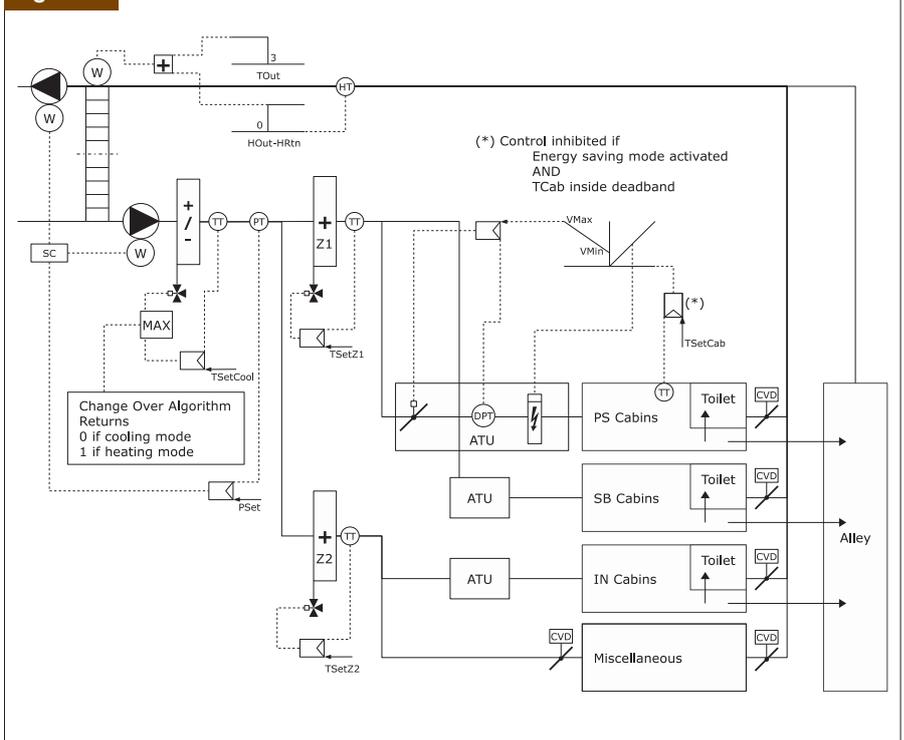


Schéma fonctionnel d'un système cabines passagers.

## À propos des auteurs

- Solamen est une société d'ingénierie spécialisée. Créée en 2009, elle collabore historiquement avec Cofely Axima sur le développement et la validation des outils d'analyse énergétique. Elle intervient par ailleurs en assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO) ou en support des équipes de maîtrise d'œuvre sur des projets de construction neuve, et en R&D avec le CSTB, l'IFSTTAR et le CETE. Antoine Gautier en est le directeur général.
- Cofely Axima, du groupe GDF Suez, est une entreprise de génie climatique très présente sur les grands secteurs d'activité. La cellule efficacité énergétique et environnementale (3E) est spécialisée dans l'étude des systèmes CVC par simulation et intervient en support des projets de réalisation. Elle est rédigée par Benoît Cogné. Dominique Bodet est responsable de la maintenance au sein du département marine.
- STX France est un constructeur de navires à forte valeur ajoutée. Le bureau d'études HVAC a collaboré activement aux travaux de validation en réalisant notamment de nombreuses mesures à bord. Olivier Boisseau est chargé d'affaires et Thomas Hervouet est responsable études et essais.

tribution, batterie froide (modèle d'échangeur à deux états avec recherche itérative de la fraction humide), échangeurs variés, humidificateur, ventilateur (résolution itérative sur la vitesse de rotation pour la détermination du rendement à partir des courbes caractéristiques dans le domaine des coefficients adimensionnels de Rateau), moteur (corrélation empirique du rendement au taux de charge), poutre climatique, ventilo-convecteur, centrales de traitement d'air (CTA) à recyclage ou tout air neuf ;

- les systèmes divers : éclairage naturel (modèle simplifié fondé sur le facteur de lumière du jour étendu), éclairage artificiel, store vénitien, infiltrations (modèle aérodynamique multi-zone avec itération sur

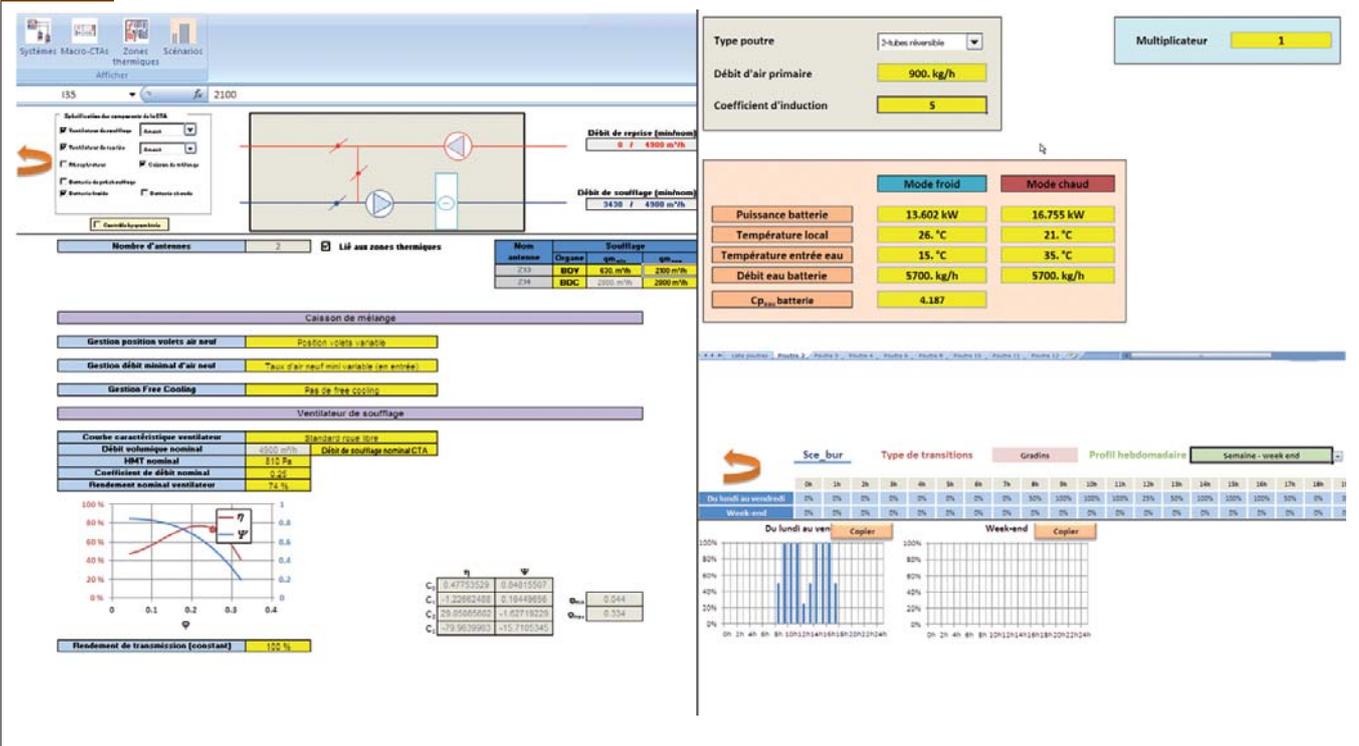
les pressions intérieures pour équilibrer l'ensemble des débits d'infiltration et de ventilation à l'échelle du bâtiment). Tous les modèles ont été élaborés selon un principe de paramétrage ne nécessitant pas la connaissance des caractéristiques physiques détaillées du système mais celle de son comportement en un point de fonctionnement. Les données issues des spécifications fournisseurs peuvent donc être directement utilisées. Mieux encore, le paramétrage se fait aujourd'hui presque intégralement via une interface Visual Basic (VBA) (figure 3), ce qui améliore considérablement la productivité et la qualité des études. Par ailleurs, les boucles de régulation suffisamment simples (par exemple, la régu-

lation 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 (Proportionnel intégral) et les instabilités de régulation associées, typiquement difficiles à maîtriser en simulation pour des pas de temps de l'ordre du quart d'heure.

## 4 - Aérodynamique

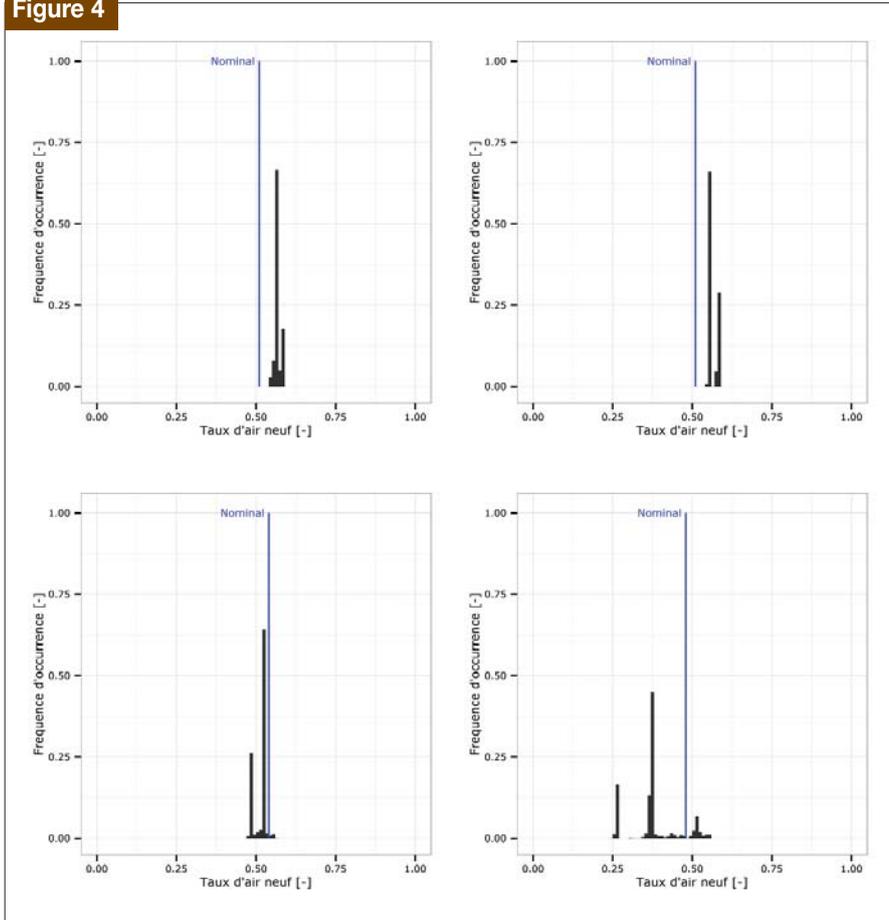
La pratique usuelle consiste à estimer les lois de variation du point de fonctionnement ( $V$ ,  $\Delta P$ ) des ventilateurs par une étude aérodynamique préalable et à calculer sur cette base la puissance électrique absorbée à l'aide des modèles décrits précédemment. Le taux d'air neuf des centrales à recyclage est par ailleurs supposé ne dépendre que de la position des registres du caisson de mélange et pas de la pression à ses bornes. Toutefois, les spécificités de la distribution d'air dans les navires ont conduit à expérimenter 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 aérodynamique des systèmes entre eux, c'est-à-dire une interdépendance des points de fonctionne-

Figure 3



Interface graphique Visual Basic (VBA) pour le paramétrage des composants Trnsys.

Figure 4



Distribution annuelle des taux d'air neuf. De haut en bas et de gauche à droite : Wine Bar, Cafeteria, Disco Arcade, Restaurant.

ment 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 aéralique 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. 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. Une validation a enfin été réalisée au cours d'une campagne d'essais spécifique.

Des perturbations significatives du taux d'air neuf (jusqu'à une diminution de moitié) sont bien mises en évidence sur la base de simulations à l'année ; elles apparaissent toutefois très disparates d'un système à l'autre (figure 4). 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

[2] ASHRAE. Measurement of Energy and Demand Savings. Guideline 14-2002, 27 June 2002.

valident le bien-fondé d'une modélisation aéralique simplifiée dans le cadre d'analyses énergétiques à l'échelle d'un ensemble de systèmes.

### 5 - Validation expérimentale

Une vingtaine de capteurs enregistreurs autonomes ont été installés durant une semaine d'exploitation normale du navire en Méditerranée (au cours des mois de juin et juillet 2013). Ces mesures sont complétées par une centaine de points archivés via le système de supervision. L'analyse statistique des écarts calcul/mesure est réalisée selon les spécifications de l'ASHRAE Guideline 14 [2].

- Soit  $o_i$  la valeur mesurée,  $y_i$  la valeur calculée et  $n$  la taille de l'échantillon ;
- CVRMSE est l'incertitude de calcul sur les puissances instantanées ;

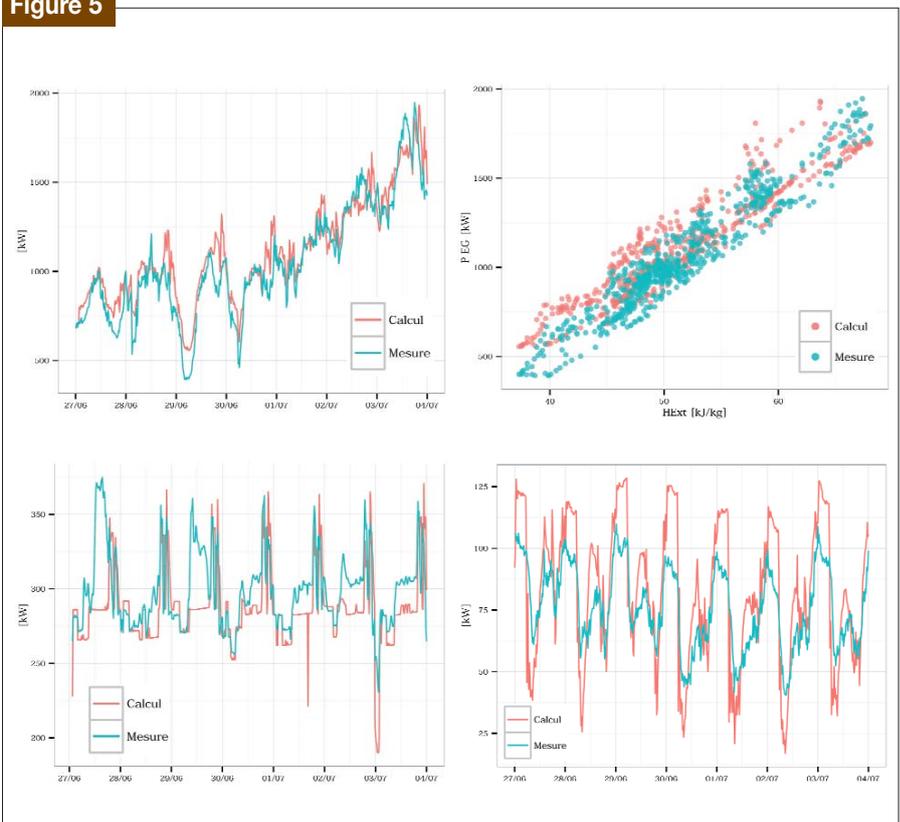
$$CVRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (o_i - y_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_1^n o_i}$$

- NMBE = est la composante systématique de cette incertitude et correspond à l'écart de calcul/mesure sur les consommations.

$$NMBE = \frac{\sum_1^n o_i - y_i}{\sum_1^n o_i}$$

Le figure 5 présente les puissances calculées et mesurées pour les trois postes

Figure 5



Comparaison des puissances calculées et mesurées (pas de temps 15').

Tableau 2

Poste (grandeur moyenne sur 15')	Incertitude CVRME [-]	Dont biais systématique NMBE [-]
Puissance thermique eau glacée	11,2 %	- 5,8 %
Puissance électrique ventilateurs	8,9 %	3,9 %
Puissance électrique réchauffeurs	23,5 %	- 8,9 %

## Précision du modèle à l'échelle de la tranche.

étudiés à l'échelle de la tranche. Le **tableau 2** présente les statistiques associées sur les écarts calcul/mesure.

Le modèle satisfait largement 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 CVRME et  $\pm 10\%$  pour NMBE [2]. À noter qu'aucun calibrage n'a été nécessaire ici. Les écarts calcul/mesure sur les consommations d'énergie durant la semaine de cam-

pagne sont inférieurs à 10 % quel que soit le poste étudié. Aucun biais significatif n'ayant été détecté sur les mesures de puissance, l'écart calcul/mesure sur les consommations est assimilable à une incertitude totale.

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 en partie 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.

## 6 - Aide à la conception

Les performances du modèle révélées par la comparaison calcul/mesure le qualifient comme outil d'analyse support à la conception ou à l'exploitation. Une série d'études a donc été réalisée afin d'objectiver le potentiel de la simulation dans ces différents contextes.

## Dimensionnement de la production d'eau glacée

Une simulation est effectuée sur 48 h, correspondant à la répétition d'une journée extrême de type ASHRAE [3] passant par le point de design : 35 °C/70 % RH. Sur ce cycle de sollicitations extrêmes, l'impact de plusieurs scénarios de sous-dimensionnement de la production d'eau glacée est étudié :

- Base : cas de base au dimensionnement d'origine ;
- KDim0{XX} : cas avec un sous-dimensionnement de (100 - XX) %.

Les batteries froides sont redimensionnées en conséquence, en considérant le même facteur de réduction du débit nominal d'eau glacée que celui appliqué sur la production. Cela implique une température de sortie liquide augmentée pour une puissance froid inchangée au nominal, c'est-à-dire une taille d'échangeur accrue.

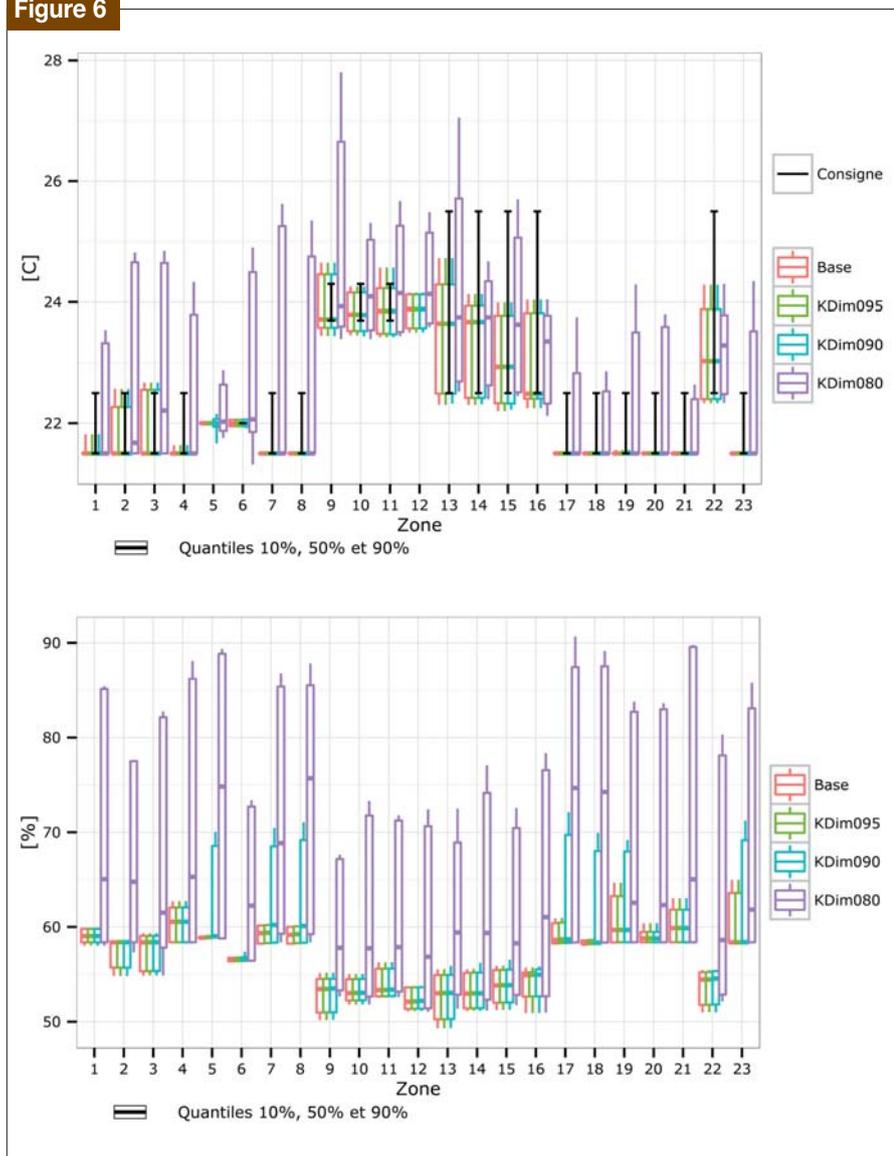
Aucune dérive de température intérieure n'apparaît pour un facteur de sous-dimensionnement inférieur ou égal à 10 % (**figure 6**). Les dérives observées sur les températures du réseau d'eau glacée régulé à température de retour constante (**figure 7**) sont en effet absorbées par les marges de dimensionnement suivantes :

- Batteries froides : dimensionnées sur un régime plus chaud (8/18,6 °C) que la production (5/12 °C) pour couvrir la non concomitance des pics de charge secondaires et primaires ;
- Débits d'air des systèmes cabines : peu foisonnés entre les files bâbord et tribord.

Des dérives d'humidité relative apparaissent toutefois pour un sous-dimensionnement de 10 % mais restent limitées à environ + 10 %.

Des calculs complémentaires montrent une faible sensibilité de l'effet du sous-dimensionnement aux scénarios de charges internes (qui présentent typiquement une incertitude importante). Par ail-

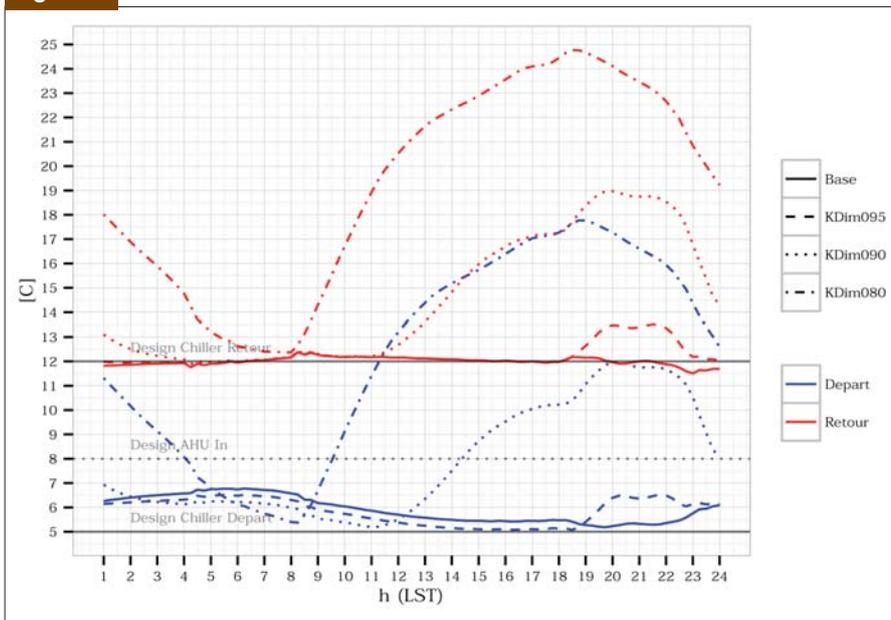
Figure 6



Statistiques sur les caractéristiques de l'air au cours d'une journée extrême, par zone thermique.

[3] ASHRAE. Fundamentals, 2009.

Figure 7



Températures du réseau d'eau glacée au cours d'une journée extrême.

Figure 8

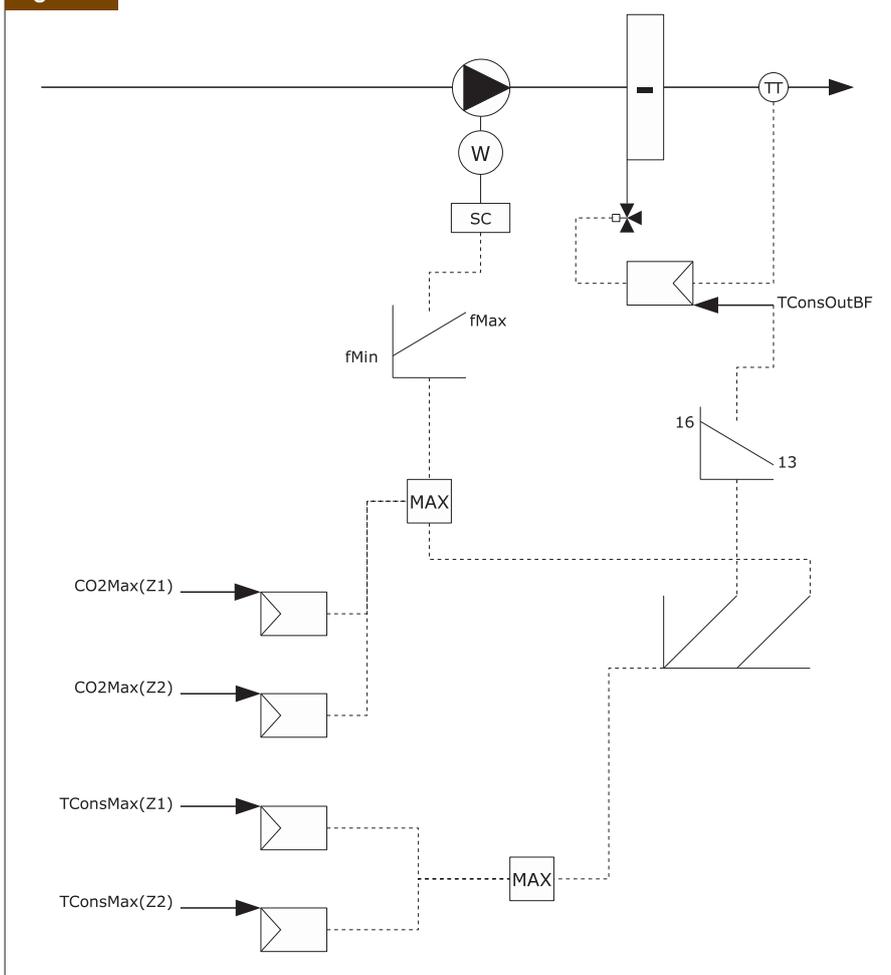


Schéma de régulation en séquence des systèmes publics (zones Z1 et Z2). Le signal de sortie maximale des régulateurs de température des zones Z1 et Z2 est utilisé pour définir la température maximale de soufflage (par action sur la vanne de la batterie froide, en haut à droite) et, en séquence, le débit de soufflage, par action sur la fréquence du variateur du ventilateur de soufflage, en maintenant une fréquence minimale nécessaire pour le maintien de la consigne de qualité d'air (signal maximale des régulateurs de qualité d'air des zones Z1 et Z2).

leurs, un automatisme de délestage de la production d'eau glacée via un offset sur les consignes des systèmes Galleys a été simulé et s'avère efficace pour contenir les dérives de température même dans le cas d'un sous-dimensionnement de 20 %, les dérives d'humidité relative étant là encore inférieures à + 10 %.

### Variante fonctionnelle – Régulation de température des locaux publics

Les systèmes publics sont régulés avec une consigne de soufflage fixe (13 °C) en sortie de la batterie de prétraitement et une augmentation de la vitesse des ventilateurs en demande de froid. Le gain associé à une consigne de prétraitement variable (13 - 16 °C) est évalué sur la base d'une simulation à l'année en considérant un scénario de croisière typique du navire. Le principe de régulation alternatif est représenté **figure 8** : en demande de froid, une action en séquence sur la consigne de prétraitement et sur la vitesse de rotation des ventilateurs est lancée.

La régulation en séquence permet un gain d'environ 30 % sur les consommations d'eau glacée et de 50 % sur les consommations d'eau chaude des systèmes publics. Elle entraîne en revanche une dérive d'humidité relative dans les locaux, qui reste toutefois inférieure à + 10 %.

## 7 - Aide à l'exploitation

### Optimisation du paramétrage

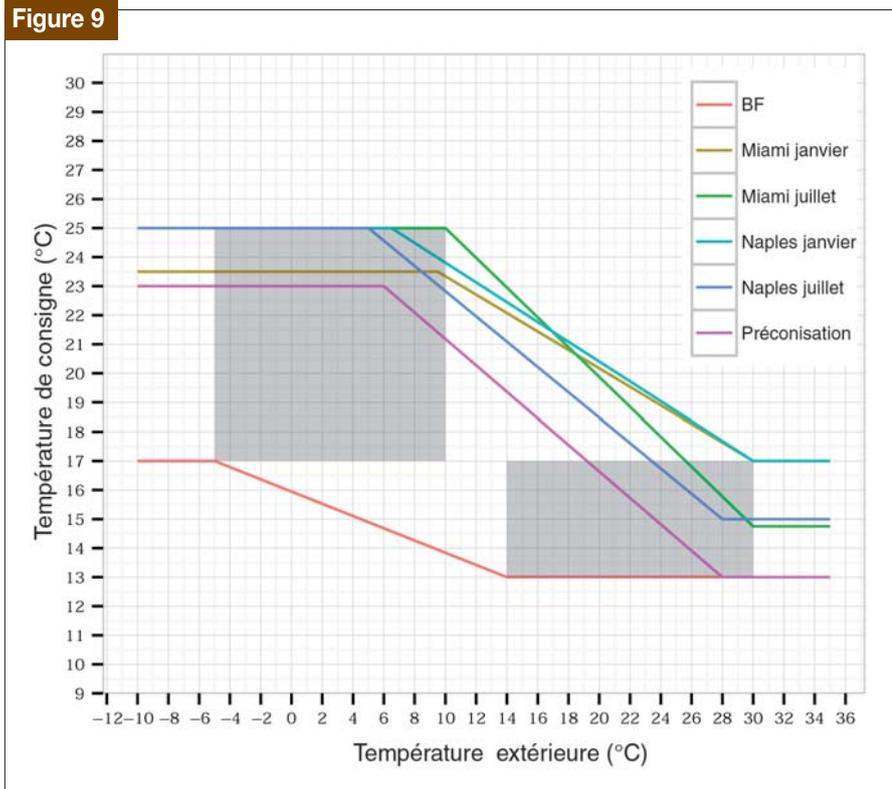
La température de soufflage des systèmes «cabines passagers» est contrôlée en boucle ouverte suivant une loi en fonction de la température extérieure. Une loi basse limite les débits d'air requis en demande de froid (et donc la puissance absorbée par les ventilateurs ainsi que la charge sur la batterie de prétraitement) mais sollicite davantage les réchauffeurs électriques terminaux en demande de chaud. Il y a donc un réglage optimal à trouver.

Pour ce faire, une optimisation est réalisée sur le domaine représenté en gris **figure 9**, pour 4 couples (localisation, saison). Le programme GenOpt<sup>[4]</sup> est utilisé en couplage à Trnsys avec l'objectif de minimiser la somme des coûts d'exploitation du système sur la saison étudiée, tout en évitant les dépassements de consigne occasionnés par des lois trop hautes.

Les lois optimales sont présentées **figure 9**. Une loi haute apparaît toujours favorable à la diminution des consommations, quelle que soit la configuration testée. L'optimum n'est en fait pas lié à l'augmentation des consommations des ventilateurs et de l'eau glacée, mais à la

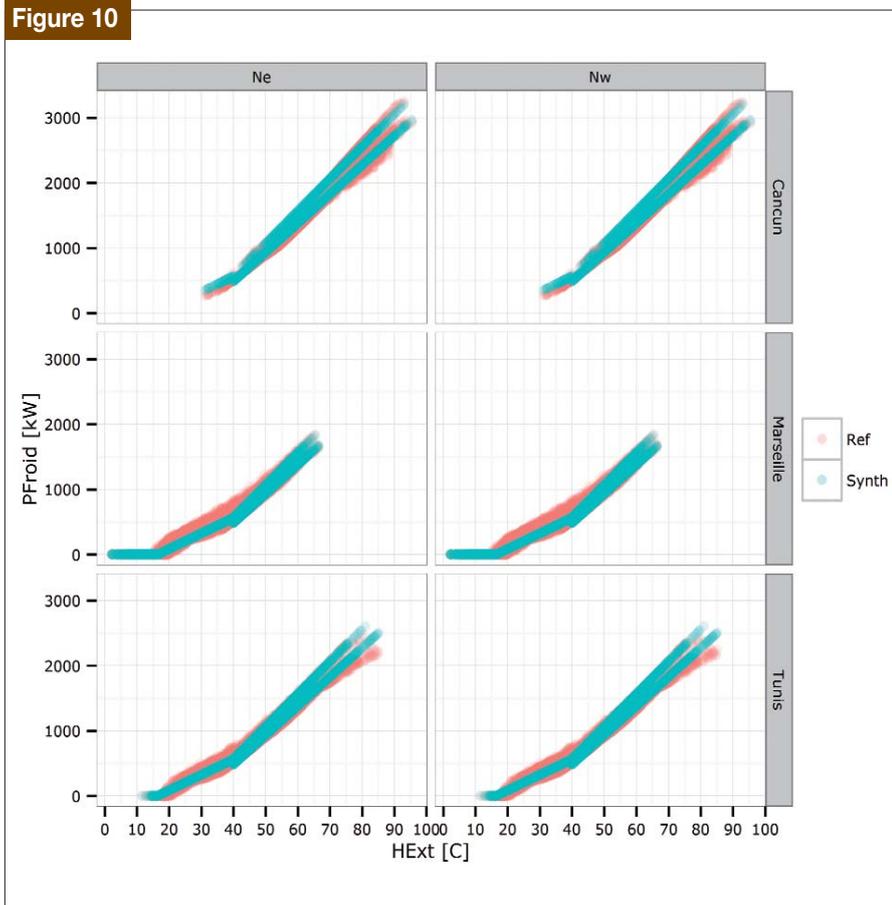
[4] M. Wetter. GenOpt – Generic Optimization Program. User Manual. Version 3.1.0. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011.

Figure 9



Optimisation des lois de réchauffage des systèmes cabines passagers.

Figure 10



Puissance froid fonction de l'enthalpie extérieure – Comparaison des deux modèles sur la base de validation, par cap navire et par localisation.

dégradation des conditions de confort. La variation du coût total est en effet plus sensible à la variation du coût des consommations électriques des réchauffeurs qu'à celle des autres postes.

**Modèle synthétique pour le suivi de la performance**

L'utilisation du modèle complet pour le suivi en ligne des installations CVC pose de nombreux problèmes d'intégration. Une alternative consiste à réduire le modèle détaillé à un minimum d'équations explicatives des grandeurs d'intérêt. Pour ce faire :

- un schéma de régression linéaire multiple des puissances CVC est mis en œuvre ;
- une analyse de sensibilité préalable permet de sélectionner les variables indépendantes les plus influentes ;
- une base de développement consistant en un jeu de sollicitations variées est utilisée pour générer les données support à la régression ;
- une base de validation distincte est ensuite utilisée pour quantifier l'incertitude du modèle réduit, par comparaison à la réponse du modèle de référence.

La puissance en eau glacée et les puissances absorbées par les ventilateurs et les réchauffeurs cabines peuvent ainsi être représentées comme des fonctions affines par morceaux d'un ensemble de trois variables : l'enthalpie et la température de l'air extérieur ainsi que l'heure du jour. La perte de précision sur les puissances instantanées est de l'ordre de 15 % par rapport au modèle de référence. La **figure 10** présente les réponses comparées du modèle de référence et du modèle réduit sur la base de validation.

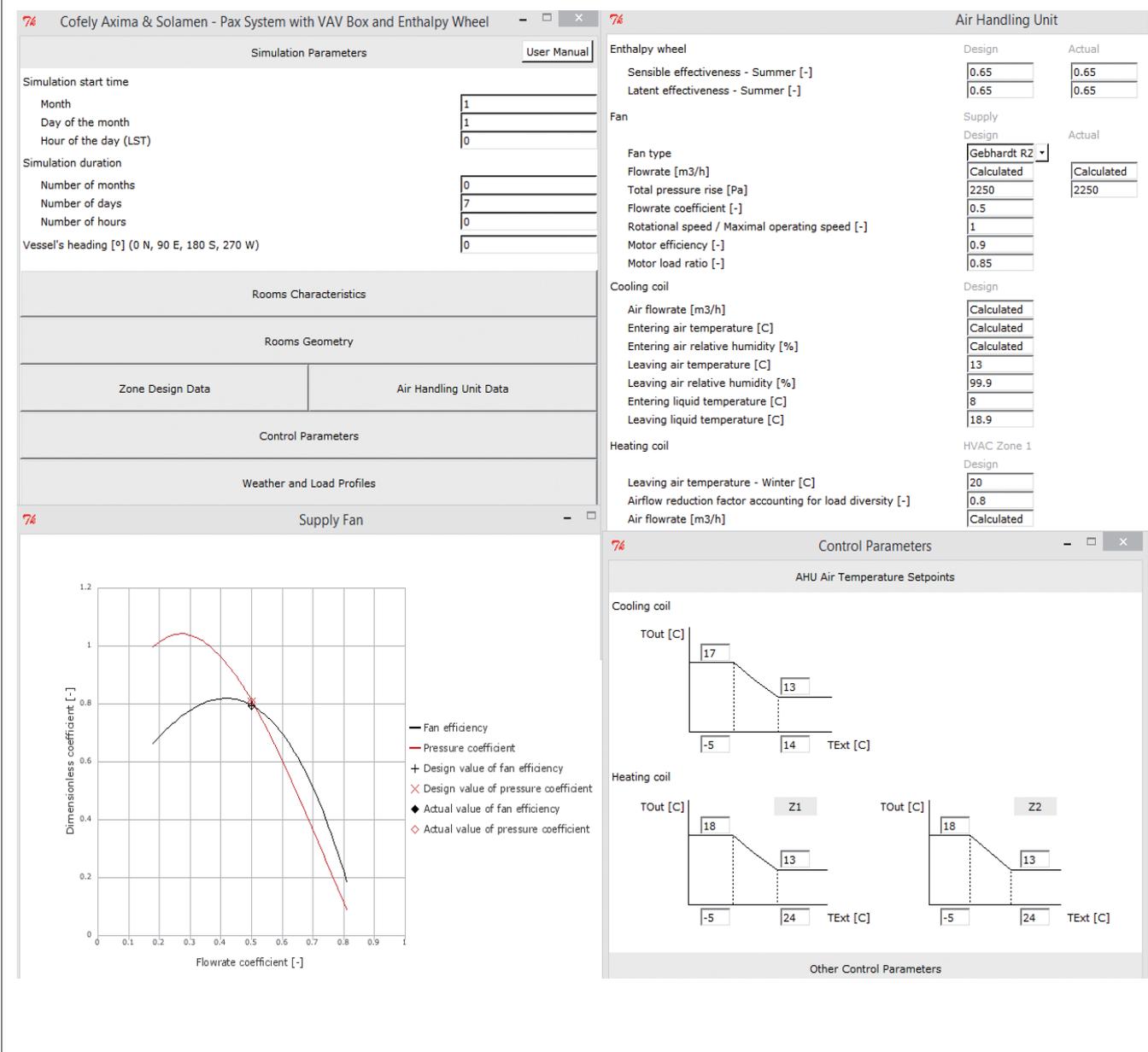
Ces lois simples peuvent être facilement implémentées dans un système de supervision pour permettre un monitoring de la performance énergétique des installations. La performance énergétique n'est en effet pas mieux définie que comme une relation entre sollicitations et énergie consommée, le modèle fournissant l'image conforme à l'exécution de cette relation.

**8 - Application autonome**

Les potentialités de la simulation sont telles qu'il est vite apparu regrettable de réserver son usage aux experts de la modélisation. D'autant plus que les concepteurs, les installateurs et les exploitants sont les meilleurs agents de l'optimisation des performances. Pour assurer une diffusion élargie de ces outils auprès de cette variété d'utilisateurs, un prototype d'application «distribuable» et facilement configurable a été produit (**figure 11**).

(Suite page 88)

Figure 11



Interface graphique de l'application autonome.

Cette application permet d'évaluer l'impact d'une sélection de variantes fonctionnelles, d'une modification des points de consigne et lois de régulation ou encore d'une amélioration des performances des équipements. Elle permet par ailleurs le chargement du modèle à partir de données mesurées et donc une analyse énergétique rétrospective pour une aide au diagnostic de performance notamment.

### 9 - Travaux en cours et perspectives

La validation expérimentale se poursuit actuellement avec l'étude d'un bâtiment

de bureaux RT 2012 où les besoins moyens sur les plages de fonctionnement des systèmes sont de l'ordre de 10 % des puissances nominales. A ce niveau de performance, de nouvelles problématiques apparaissent comme la représentation précise des puissances de relance ou la modélisation des pertes de distribution et de leur récupération. En parallèle, une thèse CIFRE (Conventions industrielles de formation par la recherche, système de financement de travaux de recherche confié à l'ANRT, Association nationale de la recherche et de la technologie) est en cours au sein de Cofely Axima, en partenariat avec l'Ecole

des Mines de Paris. Elle étudie la modélisation des incertitudes sur les calculs prévisionnels des consommations d'énergie. Les développements à venir concernent principalement les méthodes de calibrage des modèles énergétiques en vue d'une application de la simulation en contexte d'exploitation. Mais surtout, la simulation numérique est désormais utilisée au quotidien dans le cadre d'analyses coût/bénéfice variées, en support d'opérations avec engagement sur la performance ou encore comme base de développement des processus de commissionnement énergétique.