

Smart Building : vers une gestion énergétique optimisée

Fabien Clanché¹, Jérôme Gautier¹, Frédéric Hamelin¹

¹ Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN)
UMR 7039 CNRS Université de Lorraine
Faculté des Sciences et Technologies – BP 70239
54506 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex
{fabien.clanche; frederic.hamelin}@univ-lorraine.fr
gautierjerome@hotmail.fr

Résumé – La plate-forme expérimentale Eco-sûr qui s’inscrit dans un contexte global de supervision d’habitats intelligents permet d’illustrer des activités de recherche pluridisciplinaire (automatique, électrotechnique et réseaux) menées par plusieurs laboratoires lorrains (CRAN, GREEN, LICM et LORIA). Dans cet article, nous présentons l’architecture des équipements, des réseaux et la supervision mis en œuvre, nous détaillons ensuite notre démarche qui vise à proposer une stratégie de commande répondant aux exigences de confort thermique tout en minimisant l’énergie consommée. Par ailleurs, les campagnes d’essais ont permis de valider à la fois les modèles de réponse thermique mais aussi l’algorithme décisionnel basé sur les prévisions météorologiques et les modèles énergétiques des actionneurs.

Mots clés – plate-forme expérimentale, smart building, performance énergétique, intelligence artificielle, contrôle-commande, modélisation.

1. Introduction

Le confort de vie est une notion étroitement liée à celle de l’habitat intelligent. Cette perception, relative à chacun, permet de simplifier la vie des occupants d’une maison. L’habitat intelligent (ou communicant) consiste essentiellement en une intégration complexe de technologies, de matériels électriques ou thermiques, de télécommunications, d’informatisation. Cette notion d’habitat intelligent est d’ailleurs un concept qui émerge timidement en Europe, alors qu’aux Etats-Unis, un nombre relativement important de projets sur le sujet a vu le jour depuis déjà quelques années [1].

Plus spécifiquement, les notions de confort thermique, sécurité et sûreté d’un habitat intelligent avec une exploitation optimisée des énergies consommées constituent des enjeux importants. Afin de quantifier le premier concept, la notion de performance énergétique d’un bâtiment est introduite. Elle représente la quantité d’énergie consommée eu égard à un mode de fonctionnement bien précisé.

2. Contexte et objectifs scientifiques

De nos jours, la prise de conscience environnementale et le maintien du confort hydro-thermique [2] des habitants conduisent à repenser l’intégration et l’utilisation de solutions innovantes pour l’habitat en vue d’offrir plus de fonctionnalités et une meilleure performance énergétique.

L’émergence des Nouvelles Technologies de l’Information et de la Communication dans les offres en domotique (réseau Ethernet, serveurs Web embarqués, service d’envoi d’email et sms, écran de supervision...) permet de prévenir d’éventuels dysfonctionnements ou de commander certains paramètres à distance.

En complément à ce premier aspect lié à l'accès à l'information, un deuxième axe de recherche concerne la stratégie de commande à mettre en œuvre sachant que ce projet s'inscrit dans un contexte de minimisation des énergies consommées. Pour exemple, il peut être plus intéressant dans un objectif de confort thermique d'une pièce d'habitation d'agir de manière automatique sur les ouvrants de celle-ci plutôt que d'utiliser une climatisation réversible. Cependant, ce raisonnement valable au niveau d'une pièce peut ne plus l'être au niveau de l'habitat complet de par une exposition différente au soleil de chacune des pièces. Plus globalement, la stratégie de commande à mettre en œuvre doit satisfaire les contraintes imposées par un habitat intelligent non seulement en termes de confort et de sécurité mais également en termes de consommation d'énergie.

Le démonstrateur développé au sein du service plates-formes expérimentale du CRAN permet aussi de valider et d'illustrer les travaux de recherche attenants aux objets communicants, aux réseaux de capteurs sans-fil, à la production d'énergie électrique et à la modélisation et la commande des systèmes.

3. Présentation de la plate-forme expérimentale

Le système pilote permet de superviser deux salles (cf. Figure 1) qui ont une superficie de 40 m² et 60m². L'objectif du démonstrateur permet aussi d'étudier, d'analyser et d'expérimenter les interactions et les relations de communications ambiantes sans fil entre l'homme, les produits et les systèmes informatiques, dans un contexte d'environnement à intelligence ambiante.

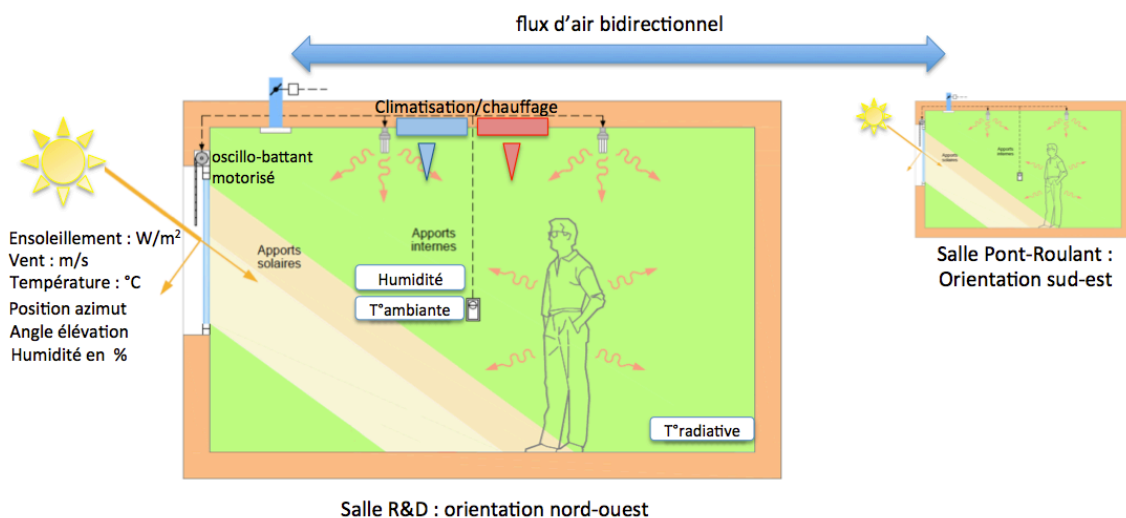


Figure 1 : schéma d'implantation

3.1 Les équipements mis en œuvre

Le procédé pilote est composé d'une architecture d'équipements hétérogènes telle que :

- des matériels permettant de mettre en œuvre des fonctions de confort thermique pour l'habitat (climatisation/chauffage, Ventilation Mécanique Contrôlée double flux, fenêtres oscillo-battantes motorisées).
- des matériels permettant de garantir une luminosité ambiante satisfaisante (système d'éclairage automatisé, stores motorisés, détection de la luminosité intérieure).
- de nombreux capteurs (température intérieure/extérieure, humidité intérieure/extérieure, luminosité, présence) nécessaires aux travaux de modélisation de la réponse thermique.

- des matériels de suivi de l'énergie consommée (compteur de consommation de l'énergie électrique) nécessaires pour élaborer des modèles énergétiques.
- une station météo qui intègre plusieurs capteurs (pluviomètre, vitesse du vent, rayonnement solaire, pression atmosphérique, température et humidité) afin d'anticiper au mieux les choix de commande des actionneurs.
- un système inverseur de source électrique assurant la fonction de commutation entre plusieurs fournisseurs d'énergie (panneaux photovoltaïques, éolienne et le réseau ERDF).
- une station de mesure de l'ambiance hygrothermique déterminant différents indicateurs de confort.

3.2 L'architecture réseau

Le système domotique se décompose en plusieurs réseaux de capteurs et d'actionneurs afin de répondre au mieux au standard du marché. L'interopérabilité (cf. Figure 2) entre ces différents réseaux et le logiciel de supervision est rendue possible via plusieurs passerelles qui effectuent une connexion vers le réseau Ethernet du laboratoire.

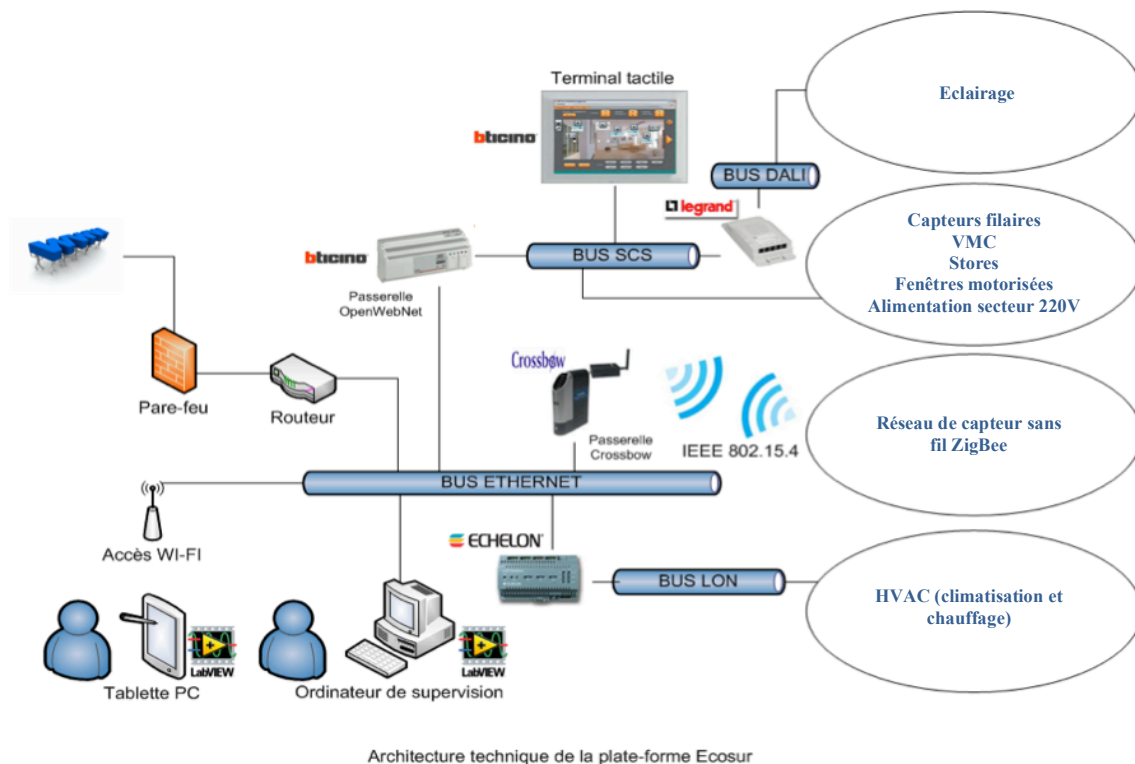


Figure 2 : Architecture technologique et réseau

De plus, l'interopérabilité des équipements [3] permet de fournir des installations avec des services et une maintenance mieux pensés tout en diminuant les coûts d'exploitation.

Ci-dessous apparaissent les spécificités des réseaux mis en œuvre.

- Le réseau LonWorks [4] (Local operating Network) est le moyen d'exploitation du contrôle-commande de la climatisation réversible (chauffage) et de la ventilation. La passerelle matérielle i.Lon du fabricant Echelon est équipée d'un serveur web embarqué (qui inclut des services Web) afin de piloter la climatisation Daikin à partir du réseau Ethernet.
- Le protocole Zigbee [5] (IEEE 802.15.4), peu gourmand en consommation, permet d'acheminer les communications radio des différents capteurs de température, d'humidité et aussi des capteurs intégrés à la station météo. La passerelle matérielle Stargate Netbridge est

équipée d'un serveur web embarqué afin de transmettre les données des 30 nœuds sur le réseau Ethernet.

- Le bus SCS [6] (Système de câblage simplifié) couvre entre autres les fonctions d'automatismes, de scénarios et de gestion de l'énergie pour la domotique. Ce réseau connecte les nombreux matériels du fabricant Bticino [7] en vue d'automatiser les stores, les fenêtres... La passerelle matérielle OpenWebNet est équipée d'un serveur web embarqué afin de piloter les équipements depuis le réseau Ethernet.
- Le protocole DALI [8] (Digitale Adressable Lighting Interface), bus de communication standardisé (IEC 60929), permet une gestion optimale de l'éclairage des 2 salles. Il est ainsi possible de commander et réguler (allumage, extinction et variation de l'éclairage) numériquement les 14 luminaires équipés de ballasts électroniques. L'un des principaux avantages de ce réseau est qu'il permet de détecter différents défauts (luminaire hors-service). Une passerelle matérielle du fabricant Bticino permet de piloter ce système d'éclairage depuis le réseau SCS.

Les protocoles de communication sont ouverts afin d'assurer l'interopérabilité avec le logiciel de commande/supervision Labview [9] de la société National Instrument offrant ainsi une flexibilité en termes d'utilisation mais également en termes de conception, test et intégration.

3.3 Surveillance/sécurité et supervision globale

Il s'agit de surveiller et de quantifier la disponibilité de l'ensemble des entités communicant sans fil, de détecter les défaillances de l'infrastructure, et d'informer et alerter en cas de défauts de sécurité notamment. La fonction de supervision, associée à la centralisation des commandes, permet de connaître le bilan thermique et énergétique du logement. Les services disponibles mis à disposition des occupants sous forme attrayante sont :

- Paramétrer le système (consignes, préférences, etc.).
- Choisir les modes de fonctionnement (configuration, manuel, automatique et dégradé).
- Superviser, à travers les synoptiques, le fonctionnement du système (source électrique, consommation d'énergie, confort ressenti, etc.).
- Gérer les alarmes (gestion d'anomalies et de défauts).
- Archiver les informations jugées utiles à la surveillance du fonctionnement du système.

Des campagnes de mesures ont permis d'obtenir une base de connaissance (base de données MySql) sur l'ensemble de nos équipements et les paramètres techniques du bâtiment. Cette connaissance globale de la plateforme qui s'enrichit avec le temps est indispensable à la fois pour l'élaboration de modèles précis et robustes mais aussi pour la stratégie de commande et le diagnostic de l'espace "éco-sûr".

Une bibliothèque d'objets logiciels représentatifs des matériels qui composent éco-sûr, disponible dans l'environnement Labview, permet aussi de développer des scénarios personnalisés à l'aide du module Statechart (diagramme états-transitions).

4. Identification et modélisation

Cette étape, clé de voute de la stratégie de commande, consiste à étudier le comportement thermique et énergétique de l'espace éco-sûr en fonction de l'effet des actions (climatisation, chauffage, ventilation mécanique contrôlée, ouvrants motorisés et stores motorisés), des conditions météorologiques et aussi de l'orientation du bâtiment.

La température ambiante centrale de chaque salle est estimée à l'aide d'un modèle qui tient compte des températures relevées à proximité des équipements pilotés mais aussi des perturbations thermiques comme l'ensoleillement. A l'aide d'une caméra thermique, une étude a permis d'identifier les points stratégiques pour le placement des divers capteurs. A partir de données climatiques de notre station météo, une simulation de plusieurs semaines a permis de vérifier la validité de la modélisation (estimation de la température ambiante centrale).

Afin de mettre en œuvre une stratégie de commande prédictive s'appuyant sur les prévisions météorologiques à court terme, nous avons établi une autre série de modèles liant ces données capteurs de l'espace "eco-sûr" aux conditions météorologiques transmises par des capteurs sans fil installés sur le toit du bâtiment (cf Figure 3).

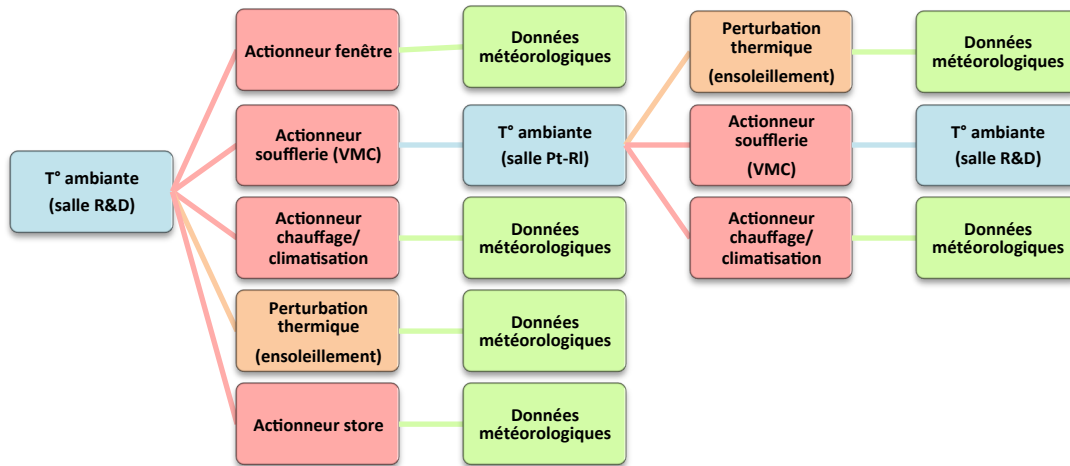


Figure 3 : représentation générale de la modélisation du système

La simulation (cf. Figure 4) qui montre l'évolution de la température prédite au centre de la pièce en fonction de l'utilisation des équipements sert également à analyser le risque de surchauffe dans les salles et à estimer la consommation énergétique de l'espace éco-sûr.

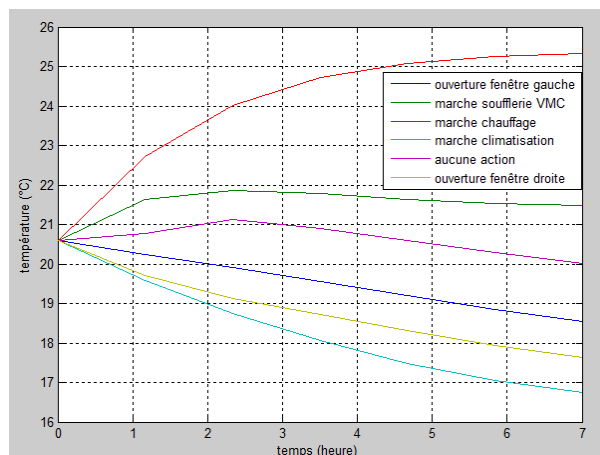


Figure 4 : prévision de la température ambiante

5. Gestion énergétique optimisée

La stratégie de commande de l'espace éco-sûr qui s'appuie sur les prévisions météorologiques des prochaines heures et la planification d'occupation des salles consiste à optimiser en permanence les consignes données aux équipements les moins énergivores en se basant sur la situation actuelle (température, ensoleillement, etc.). Comme il s'agit d'une construction à grande inertie thermique, le fait de savoir à l'avance qu'une salle renfermera 20 personnes qui dégageront environ 100 W chacune durant 8 heures, ou bien que le soleil éclairera les vitrages entre 10H et 17H le lendemain, permet d'économiser de l'énergie et d'améliorer le confort car l'effet des sources de chaleur non commandées sera pris en charge.

5.1 Prise en compte du confort

Le confort des occupants est un des paramètres que la boucle de régulation doit prendre en compte. Ainsi, la station de mesure (Figure 5) de l'ambiance hygrothermique élabore de multiples indicateurs selon les grandeurs physiques (température moyenne radiative, température sèche, humidité psychrométrique de l'air, vitesse de l'air omnidirectionnelle avec mesure de la turbulence, indice WBGT intérieur, indice PMV/PPD ISO7730, température opérative).



Figure 5 : Station de mesure du confort hygrothermique

Ces indicateurs sont utiles pour la définition de la zone de Brager [10] (Figure 6). La zone de confort (située entre les droites rouges) tient compte du fait que le corps humain est capable de s'adapter à une variation du climat intérieur (axe Y) en fonction de la température extérieure (axe X).

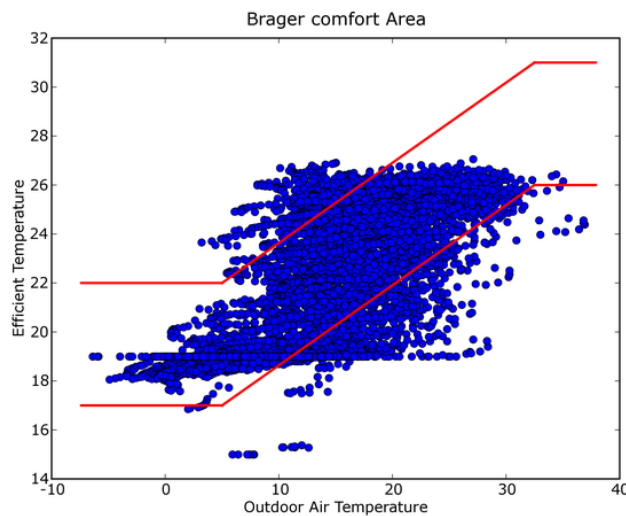


Figure 6 : zone de confort de Brager

5.2 Expression de la commande

La synthèse de la commande s'appuie sur les modèles de prédiction afin de prévoir la température ambiante aux instants suivants : $\hat{Y}_{t+n|t}$. Cette notation illustre la température prédite à l'instant $t+n$ en s'appuyant sur les données connues à l'instant t .

Les matrices sont construites ligne par ligne afin de tenir compte des actions faites aux instants précédents. Le résultat est obtenu en faisant la somme d'une réponse libre et d'une réponse forcée :

$$\begin{bmatrix} \hat{Y}_{t+1|t} \\ \hat{Y}_{t+2|t} \\ \vdots \\ \hat{Y}_{t+n|t} \end{bmatrix} = \text{réponse libre} + \text{réponse forcée}$$

- la réponse libre représente l'évolution thermique du système soumis uniquement aux perturbations ; cette entité tient également compte des actions engagées aux instants précédents.

$$\text{réponse libre} = \begin{bmatrix} 1 & \hat{T}_1(t+1) & \hat{T}_2(t+1) & \dots & \hat{T}_i(t+1) \\ 1 & \hat{T}_1(t+2) & \hat{T}_2(t+2) & \dots & \hat{T}_i(t+2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & \hat{T}_1(t+n) & \hat{T}_2(t+n) & \dots & \hat{T}_i(t+n) \end{bmatrix} \underset{A}{*} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_i \end{bmatrix} \underset{C}{}$$

La matrice A comporte d'une part les températures prédites de chaque actionneur (à l'état non commandé) à chaque pas de commande et d'autre part les températures prédites des perturbations. Aussi, une matrice C regroupe les coefficients estimateurs calculés précédemment par la régression linéaire.

- la réponse forcée quantifie l'effet thermique apporté par les actionneurs aux différents instants.

$$\text{réponse forcée} = \begin{bmatrix} \hat{\delta}_1(t+1) & \hat{\delta}_2(t+1) & \dots & \hat{\delta}_j(t+1) \\ \hat{\delta}_1(t+2) & \hat{\delta}_2(t+2) & \dots & \hat{\delta}_j(t+2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hat{\delta}_1(t+n) & \hat{\delta}_2(t+n) & \dots & \hat{\delta}_j(t+n) \end{bmatrix} \underset{D}{*} \begin{bmatrix} B_1(t+1) & B_1(t+2) & \dots & B_1(t+n) \\ B_2(t+1) & B_2(t+2) & \dots & B_2(t+n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_j(t+1) & B_j(t+2) & \dots & B_j(t+n) \end{bmatrix} \underset{B}{*} \underset{DIAG}{}$$

La matrice binaire B représente l'action démarrée à chaque pas de commande. Par exemple, pour un ordre de marche « chauffage » symbolisé par B_2 , pour tous les instants de $t+1$ à $t+n$, on détermine une suite de 0 (OFF) et 1 (ON). La matrice D représente l'impact thermique de chaque actionneur à tout instant.

La dynamique de l'expression générale est obtenue à l'aide de la matrice B. En effet celle-ci contient le scénario des actions à mener chaque heure afin de réguler la température des salles. Pour éviter des dérives thermiques dues à des perturbations inattendues ou à une erreur de modélisation, la matrice B est recalculée toutes les quinze minutes.

5.3 Simulation et optimisation sous contraintes

L'utilisation de concepts issus de l'intelligence artificielle [11] permet de prédire la réaction de l'espace éco-sûr aux contraintes internes et externes et ainsi de minimiser sa consommation d'énergie thermique pour les habitants. Pour ce faire, un algorithme (arbre) décisionnel qui contient un critère d'optimisation et plusieurs contraintes a été développé sous Matlab.

La prise en compte des périodes d'occupation/d'inoccupation de la salle par l'algorithme permet d'anticiper l'exigence de confort thermique tout en minimisant la consommation énergétique. La Figure 7 illustre l'ensemble des scénarios satisfaisant les contraintes à la fois thermiques et en terme de confort. Chaque scénario est construit d'une suite d'actions matérialisées par des arcs de couleurs (par exemple : ouvrir la fenêtre de 14H à 15H, fermer la fenêtre et mettre en marche la climatisation de 15H à 16H, etc.).

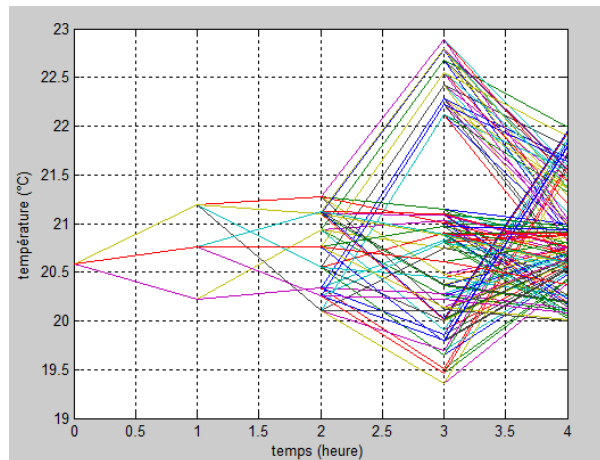


Figure 7 : scénarios respectant les contraintes

Sur ce graphique, on peut noter une zone d'occupation ($0 \leq t \leq 2$) soumise à une contrainte de confort thermique (zone de Brager) ; le choix des actions à engager est restreint.

La période qui suit ($2 < t < 4$) représente un cycle d'absence des occupants qui se répartit en deux intervalles:

- $2 < t \leq 3$: est une zone où la température de la salle doit rester comprise entre 5°C (hors-gel) et 35°C . Ces limites représentent une sécurité thermique pour éviter une éventuelle destruction du matériel.
- $3 < t \leq 4$: est concerné par les limites de capacité thermique des actionneurs les plus puissants. Dans notre cas, les limites thermiques dépendent du temps nécessaire au chauffage ou au climatiseur pour atteindre la consigne à $t=4$. Ce critère est utilisé dans le but d'optimiser la construction de l'arbre de décision.

Dans un second temps, l'algorithme sélectionne le scénario qui requiert la plus faible consommation énergétique (critère d'optimisation). La suite d'actions à mener dans chaque salle de l'espace « éco-sûr » est alors représentée dans la matrice B (cf. expression de la commande).

6. Campagnes d'essais

La mise en production de l'algorithme de commande sur notre installation, rendue possible à l'aide de l'outil Labview, nous a permis d'obtenir des premiers résultats encourageants. La figure ci-dessous montre un enregistrement d'une durée de 15 heures obtenu début avril obtenu dans des conditions réelles avec des périodes d'occupation/d'inoccupation.

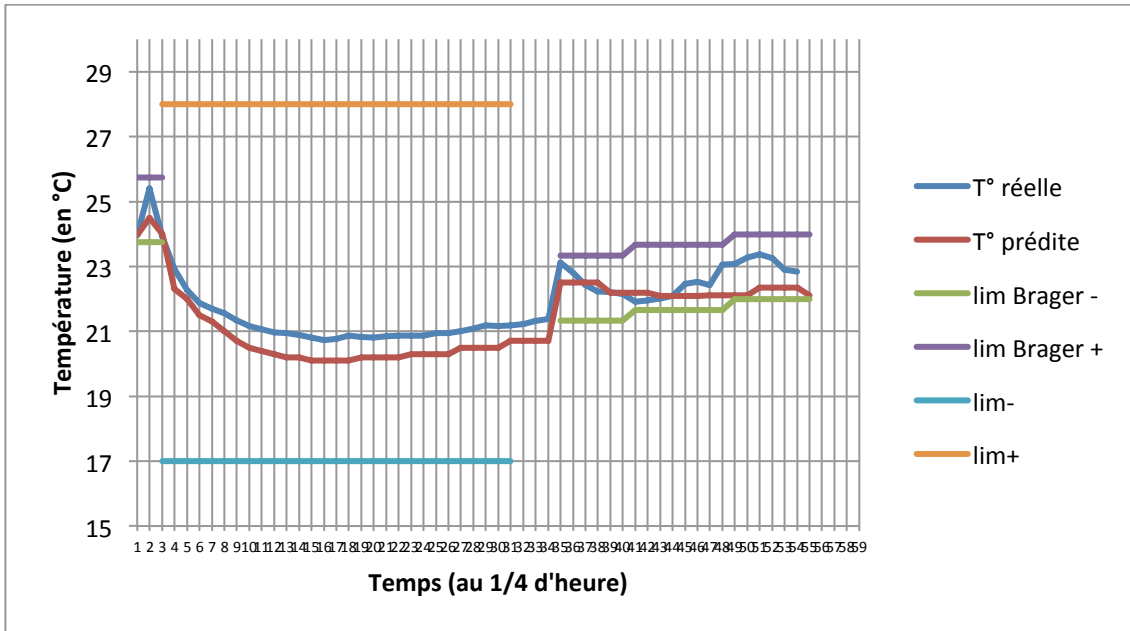


Figure 8 : campagne de mesure

Nous remarquons que la température réelle est contenue dans les limites imposées, de plus elle se rapproche nettement de la température prédite par l'algorithme. Aussi, on peut voir que les exigences de confort se réfèrent à la zone de Brager explicitée précédemment.

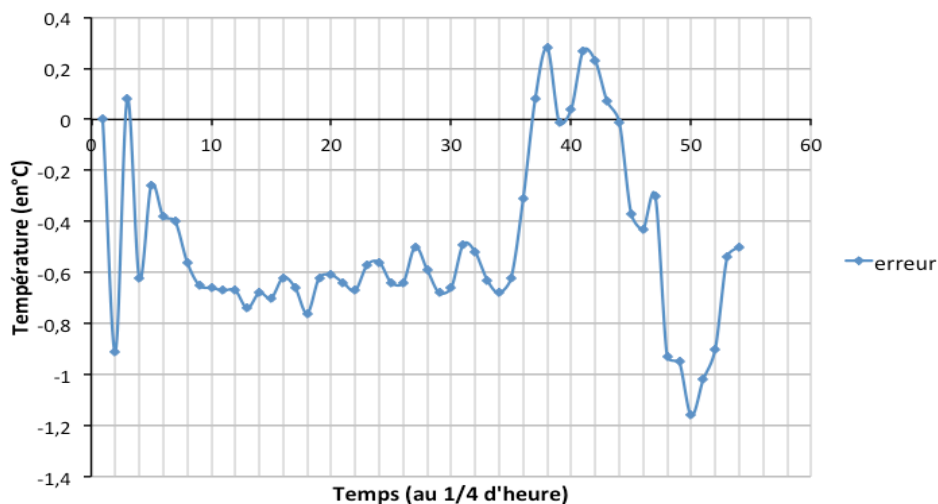


Figure 9 : erreur de prédiction

Sur la Figure 9 apparaît l'erreur entre la température réelle et prédite, celle-ci est comprise entre -1.2°C et 0.2°C , cette plage d'erreur est admissible pour le système. Néanmoins un brusque écart de température apparaît à $t=2$ et $t=38$, résultant de la mise en marche d'actionneur. Aussi, on ajoute qu'une erreur moyenne de 0.6°C apparaît sur une partie de la campagne ($10 < t < 35$).

Ces erreurs de températures sont en parties expliquées par une baisse de performance des différents modèles statiques. En effet, la campagne de mesures ci-dessus a été menée au mois d'avril utilisant des modèles construits pendant la période automnale.

Nous choisissons une solution [12] qui consiste à actualiser les modèles en mettant à jour les coefficients estimateurs à chaque instant. Ainsi, cette stratégie permet au système de s'adapter à toutes les situations, même les plus extrêmes : canicule, grand froid, orage, etc.

7. Conclusion

L'espace « éco-sûr » met à disposition des méthodes et outils de planification et contrôle de la consommation énergétique pour la gestion énergétique des bâtiments. La plate-forme est aujourd'hui opérationnelle et accessible à distance de façon sécurisée via un VPN (Réseau Privé Virtuel) pour les équipes de recherche. Un soutien financier via le contrat de projets Etat-région « Modélisation, Information et Systèmes Numériques » (2007-2013) a permis de mettre en œuvre l'ensemble des équipements industriels pour une valeur de 120 k€. La finalisation technique du projet a été aussi rendu possible grâce aux Ingénieurs du service plates-formes expérimentales qui ont participé à la conception et aux développements matériels et logiciels durant 4 ans.

8. Bibliographie

- [1] Jeuland, F. X. (2010). "La maison communicante". Eyrolles. ISBN:9782212114294
- [2] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (2004), ANSI/ASHRAE Standard 55-2004.
- [3] Clanché, F., Kabadi, M. G., & Hamelin, F. (2011). "Plate-forme pour l'optimisation énergétique des habitats intelligents". CETSIS, Trois-Rivières (Canada).
- [4] www.lonmark.org
- [5] www.zigbee.org
- [6] www.myopen-legrandgroup.com
- [7] www.bticino.fr
- [8] www.dali-ag.org
- [9] <http://france.ni.com>
- [10] Brager, G. S., & de Dear, R. (2000). "A Standard for Natural Ventilation". ASHRAE Journal (Octobre), 21-28
- [11] MOROSAN, P. D. (2011). "Commande predictive distribuée. Approches appliquées à la regulation thermique des bâtiments", p 59.
- [12] Boukhobza, T. & Hamelin, F. (2011). "Observability of switching structured linear systems with unknown input: a graph-theoretic approach". Automatica, 47 (2), pp 395-402.