

# Contribution à la mise au point d'un modèle "en boîte grise" pour le contrôle prédictif de la consommation énergétique des bâtiments

Etienne BERTAUD du CHAZAUD<sup>1\*</sup>, Jean-Michel BALEYNAUD<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Physique de l'Homme Appliquée à Son Environnement  
Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 118, route de Narbonne – 31062 Toulouse cedex 04

\* (auteur correspondant : etienne.bernaud@univ-tlse3.fr)

**Résumé** - Les modèles de contrôle prédictifs sont des outils prometteurs pour l'optimisation énergétique des bâtiments. Ajustés via un jeu de mesure aux bâtiments qu'ils modélisent, ils permettent de détecter des comportements singuliers sur des périodes données ou encore prédisent le comportement de ces derniers à l'aune d'une prévision météorologique et permettent ainsi d'anticiper des réglages adaptés. Alors que les modèles explicites utilisés aujourd'hui nécessitent un réajustement inter-saisonnier, nous présentons ici un modèle à 7 résistances et 3 capacités qui permet une description plus fine de la relation bâtiment-soleil et qui permet de s'affranchir de ce réajustement. Le modèle est défini une fois pour toute et contient ainsi des informations patrimoniales fiables.

## Nomenclature (extrait)

$\theta_i$	Temp. de l'air intérieur, °C	$C_{jv}$	Capacité thermique parois verticales, kJ/K
$\theta_s$	Temp. équiv. convect.-radiat. parois, °C	$C_{jh}$	Capacité thermique parois horiz., kJ/ K
$\theta_{mv}$	Temp. de masse parois verticales, °C	$C_h$	Capacité thermique parois internes, kJ/K
$\theta_{mh}$	Température de masse parois horiz., °C	$H_{msv}$	Fact. transmis. internes parois vertic., W/K
$\theta_{eieq}$	Température air entrant dans le groupe, °C	$H_{emv}$	Fact. transmission parois verticales environnement extérieur - surface intérieure, W/K
$\theta_{op}$	Température opérationnelle, °C		

## 1. Introduction

Dans le contexte de réchauffement climatique global, la recherche de solutions permettant de réduire les rejets d'énergie dans l'environnement est devenue une préoccupation largement partagée à tous les niveaux de la société dans la majeure partie des pays. Des mesures ont été prises, concernant le bâti et ses équipements et des méthodes, normes, techniques, et outils ont vu le jour et se sont vulgarisés. Avec la modernisation progressive de l'habitat, une limite finira par être atteinte qui rendra difficile d'aller plus loin. En revanche, il existe d'autres champs potentiels de progrès pour ce qui concerne la gestion de l'énergie active mise en jeu pour le chauffage et la climatisation. En particulier on peut tendre vers une optimisation de cette gestion en fonction des contraintes climatiques et d'usage des bâtiments.

## 2. Outils de contrôle de l'énergie de climatisation des bâtiments

L'équilibre climatique du bâtiment est fondé sur la juste compensation des déperditions par l'action des systèmes de climatisation, suivant une loi de consigne adaptée à l'usage des locaux fait par ses usagers. Il s'agit donc d'un problème de contrôle adaptatif qui s'applique à deux systèmes complexes en équilibre contrôlé avec leur environnement.

### 2.1. Etat de l'art

La solution pratique communément mise en œuvre consiste à doter les équipements actifs d'une série de régulateurs préprogrammés (automates) se basant sur un ou plusieurs capteurs climatiques (ambiance intérieure, extérieure) et éventuellement supervisés par une gestion

technique centralisée. Ce dispositif permet de remplir les missions affectées mais de manière non-optimale et bornée. En effet, la prise en compte de l'"usage" du bâtiment reste ignorée et/ou subie.

Le développement récent d'outils de contrôle à distance a permis d'envisager l'intervention d'un modérateur intelligent qui fait entrer la connaissance de l'"usage" dans le paramétrage dynamique, par exemple les thermostats connectés comme Nest ou Netatmo. Ce n'est encore qu'une étape vers ce que l'on appelle parfois le "Smart control".

Des travaux ont été entrepris sur les deux plans de cette chaîne énergétique: des chercheurs ont imaginé d'embarquer un simulateur de comportement thermique et énergétique du bâtiment concerné dans un régulateur [1] et d'autres un simulateur d'équipement de contrôle climatique dans un simulateur dynamique de bâtiment [2], [3], [4]. Ces actions ont pour but commun l'optimisation de gestion des équipements et représentent en réalité deux voies similaires de résolution du même problème. Simuler le comportement collaboratif des deux systèmes reste l'objectif à atteindre.

L'"usage", tout autant que la caractérisation représentative du bâtiment représentent l'information patrimoniale et c'est dans cette direction que se portent nos efforts. C'est donc dans cette optique que l'article se développera.

### ***2.1.1. Les travaux de référence en modélisation énergétique du bâtiment***

Il existe de nombreux travaux concernant les modèles réduits de simulation thermique dynamique du bâtiment. Certains ont conduit à la génération d'outils pour la profession, tels que TRNSYS, Pléiades et s'appuient sur une description très détaillée du système. Les modèles qui nous préoccupent sont de taille considérablement plus réduite et contiennent pour une part de l'information physique et pour une autre part une information identifiée par voie d'ajustement de modèle sur des expérimentations. Ce type de modèle est connu sous le vocable de boîte grise, où l'assombrissement couvre ce qui ne peut être mis sous forme lisible d'équations physiques. Du point de vue de l'écriture, nombre de ces modèles s'appuient sur l'analogie électrique des phénomènes thermiques et sur une représentation du bâtiment sous forme de réseau électrique. Un des intérêts majeurs de cette option réside dans le fait que ces systèmes étant linéaires, leur champ d'application est très large, leur mise en équation simple et leur résolution peu gourmande en temps de calcul.

Il convient de noter que l'agrégation des données croît lorsque la taille du modèle se réduit, ce qui induit naturellement la nécessité d'un compromis pertinent en regard des objectifs visés.

Parmi les ressources qu'offre la bibliographie, nous citerons les travaux [5], [6], [7] et [8] qui mettent en évidence la complexité que présente le choix d'une solution acceptable et les limites de leur applicabilité en fonction de leur structure et proposent des solutions précieuses. Sans être exhaustifs à l'égard des schémas envisageables, ces travaux présentent des investigations systématisées et des méthodes d'évaluations extrêmement pertinentes des modèles proposés. Ainsi, Fraisse [5] a pratiqué une évaluation du mode de réponse en utilisant des méthodes spectrales et a comparé les suivis d'évolutions de températures avec des simulations effectuées avec TRNSYS qui est un logiciel de STD reconnu dans le milieu de la thermique du bâtiment. Bacher [6] a adopté une démarche analogue davantage orientée sur la méthode d'identification et la précision des paramètres ainsi issus de l'expérience. En 2012, Berthou [2] fait une revue des méthodes d'identification et travaille également sur les périodes d'échantillonnage nécessaires à l'identification dans le cadre d'un apprentissage du comportement du bâtiment, ce qui représente un point clef dans la construction de modèles réduits fiables; la validation des modèles se fait sur la prévision des consommations, soit une

donnée intégrale du problème; il démontre au passage les avantages présentés par les modèles boîtes grises sur ceux en boîtes noires en termes de capacité de rendu pour des configurations d'application variées. Il propose plus récemment [7] des modèles intégrant jusqu'à 3 capacités (dont une destinée à représenter l'inertie des systèmes actifs) et les compare aux modèles plus communs limités à deux en modérant leur représentativité en regard des applications soit de suivi de température, soit de suivi énergétique en chauffage et en rafraîchissement. Dans les travaux récents de Reynders [8], la représentativité des modèles comprenant jusqu'à 3 capacités (dans ce cas-là, les 3 capacités sont affectées à la représentation du bâti) est évaluée grâce à une étude de leur sensibilité à des jeux de sollicitations judicieusement choisis; ainsi, c'est la qualité physique de leur réactivité qui est mise en évidence. Un point commun de la plupart de ces études est qu'elles mettent en évidence la nécessité d'un calage saisonnier du simulateur à défaut duquel on observe une dérive de rendu du comportement simulé par rapport à l'expérience.

Ces études nous ont été précieuses dans le cadre des développements, nous ont aidé à orienter nos travaux et nous ont encouragés. Notre méthode de recherche du modèle pertinent pour nos objectifs est quelque peu différente et sera exposée plus loin.

### **3. Du modèle 1 capacité au modèle à 3 capacités**

A l'instar de nos prédécesseurs, nous avons opté pour un modèle analogique de type RC et générateurs. Nous avons commencé par une mise en application du schéma développé dans la norme ISO/FDIS 13790 (Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling, repris comme modèle dans la réglementation française « RT2012 »), toutefois avec quelques modifications mineures sur un exemple simple de bâtiment. Le modèle proposé comporte 5 résistances et une capacité et la symbolisation retenue pour la suite est 5R1C. Cette application a rapidement débouché sur une application à un ensemble de quatre bâtiments du campus, récemment rénové: la MRV (Maison de la Recherche et de la Valorisation) et sur lequel une expérimentation avait été menée sur la phase transitoire entre la réception des travaux et le développement de son occupation par ses usagers, soit une période de quatre mois. Il est à noter, et c'est également une originalité de cette étude, que ces bâtiments restent « standards », tant dans leur conception que dans leur équipements. Comparativement à de nombreuses études, le nombre de points de mesures reste modeste, ce qui est représentatif du parc immobilier réel.

Compte tenu des faiblesses connues du modèle 5R1C, nous sommes rapidement passés à un modèle 5R2C qui offre de meilleures qualités de rendu du comportement dynamique du bâtiment, tout en souffrant encore d'un certain nombre de défauts que les chercheurs précités ont clairement mis en évidence et parmi lesquels nous citerons: une réponse discutable au rayonnement solaire et le problème de calage saisonnier qui justifie la suite de l'étude.

Les tentatives de validation opérées sur diverses séquences climatiques au regard des expérimentations antérieures et de mesures ad-hoc nous ont convaincu de la nécessité d'un approfondissement du problème. Nous avons donc entrepris une revue de détail des équations, non pour les contester mais afin d'ajuster le contenu sémantique à la terminologie employée dans le cadre de la norme qui nous a servi de base pour les développements de modèles; afin d'en faire le meilleur usage possible. Un petit utilitaire a été créé, d'usage intuitif mais chargé de centraliser la connaissance utile à un bon usage du modèle et à faciliter l'interfaçage entrée/sortie avec l'environnement MATLAB où a été implémenté le modèle sous un codage très basique, au plus près de l'expression physique. Cet outil a permis également la vérification et l'épurement des équations constitutives du modèle et a également aidé dans son amélioration.

Ainsi, suite à un certain nombre de tests, nous avons été amenés à envisager le fait que la nécessité notoire de calage saisonnier des modèles réduits pouvait être intrinsèquement liée à leur structure. Toutefois, compte tenu du niveau d'agrégation de données structurales d'un modèle 5R2C, la déconvolution du signal n'aurait pas permis de remonter au niveau paramétrique adapté, tout du moins non sans difficulté. Mais des observations nous ont aiguillé dans une voie praticable. Un phénomène typiquement saisonnier est le comportement connu et différencié des parois extérieures verticales et horizontales, du moins la toiture. Ainsi suivant la saison et donc la hauteur correspondante du soleil, les murs et la toiture jouent un rôle plus ou moins prédominant. La prise en compte de cette distinction requiert l'ajout d'une résistance et d'une capacité au modèle. Tout naturellement, la distinction opérée entre les parois conduit à différencier les planchers, cloisons et murs intérieurs ainsi que les masses mobilières dont la dynamique diffère notablement des murs extérieurs et toiture, ceci d'autant plus que la construction et la rénovation progressent ; ce choix a également été opéré par Reynders [8]. Cette opération coûte a minima une capacité supplémentaire.

La conjonction de ces considérations nous a conduit progressivement à la mise au point du modèle 7R3C ainsi constitué. La figure 1 présente le modèle 5R2C et la figure 2 son évolution vers le modèle 7R3C expliquée plus haut, en reprenant la formalisation créée par Christian Cardonnel pour l'usage de la RT2012, suivant Duchatelle [9].

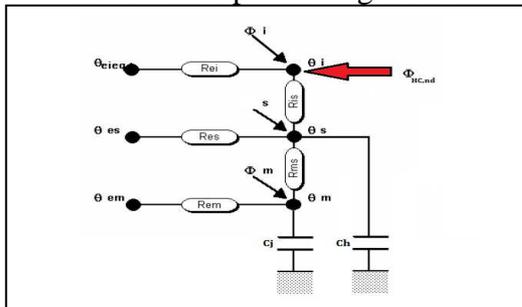


Figure 2 : Le modèle 5R2C

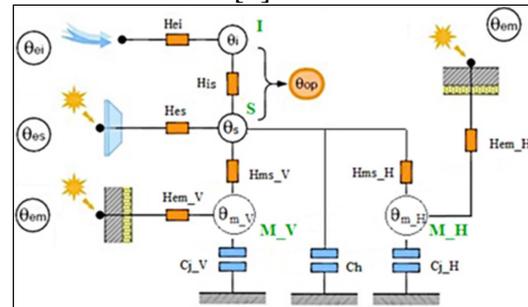


Figure 3 : Le modèle 7R3C

Parallèlement, la représentation du flux solaire entrant a fait l'objet d'une réflexion profonde et de tests. Il en a découlé une nouvelle formulation du problème permettant de substituer à la représentation uniforme du rayonnement sur les parois transparentes assortie de paramètres saisonniers, une écriture prenant en compte le chemin optique réel en fonction de l'instant considéré à n'importe quel moment de l'année; on remonte ainsi à une formulation plus physique du flux entrant, qui a toutefois un coût en taille et temps calcul.

#### 4. La mise à l'épreuve du modèle à 3 capacités

Cette opération comporte 3 phases: pertinence de l'identification et étude de sensibilité paramétrique, confrontation à des simulations de référence et validation expérimentale.

##### 4.1. Validation théorique

Ainsi qu'il a été dit plus haut, l'abondance et la qualité des ressources bibliographiques concernant les modèles RC (modèles par analogie électrique résistances capacités) est grande et constitue un appui significatif pour les travaux de développement. En nous appuyant sur ces publications, nous avons trouvé nombre d'informations pertinentes sur des modèles structurellement très similaires au nôtres, principalement pour le 7R3C. Les analyses de sensibilité réalisées par les auteurs sont aisément transposables pour notre modèle, ainsi qu'une partie des conclusions. Ce contexte nous a permis de limiter nos travaux sur ce point et il ne semble pas pertinent de les exposer dans l'espace limité de ce document.

## 4.2. Confrontation à un logiciel professionnel reconnu

Comme le font la plupart des chercheurs dans notre domaine, nous avons confronté les simulations de notre modèle avec celles de Pléiades-Comfie (distribué par IZUBA) qui est l'un des simulateurs thermiques dynamiques les plus reconnus et utilisés en France. Cet environnement constitue ainsi une référence.

La figure 3 présente la confrontation du modèle 7R3C avec Pléiades (STD) sur une année de simulation en évolution libre pour le bâtiment A de la MRV. Ce bâtiment comporte une centaine de locaux (bureaux et salles de réunion) sur 3 étages, 2 cages d'escaliers et deux CTA (Centrales de traitement d'air).

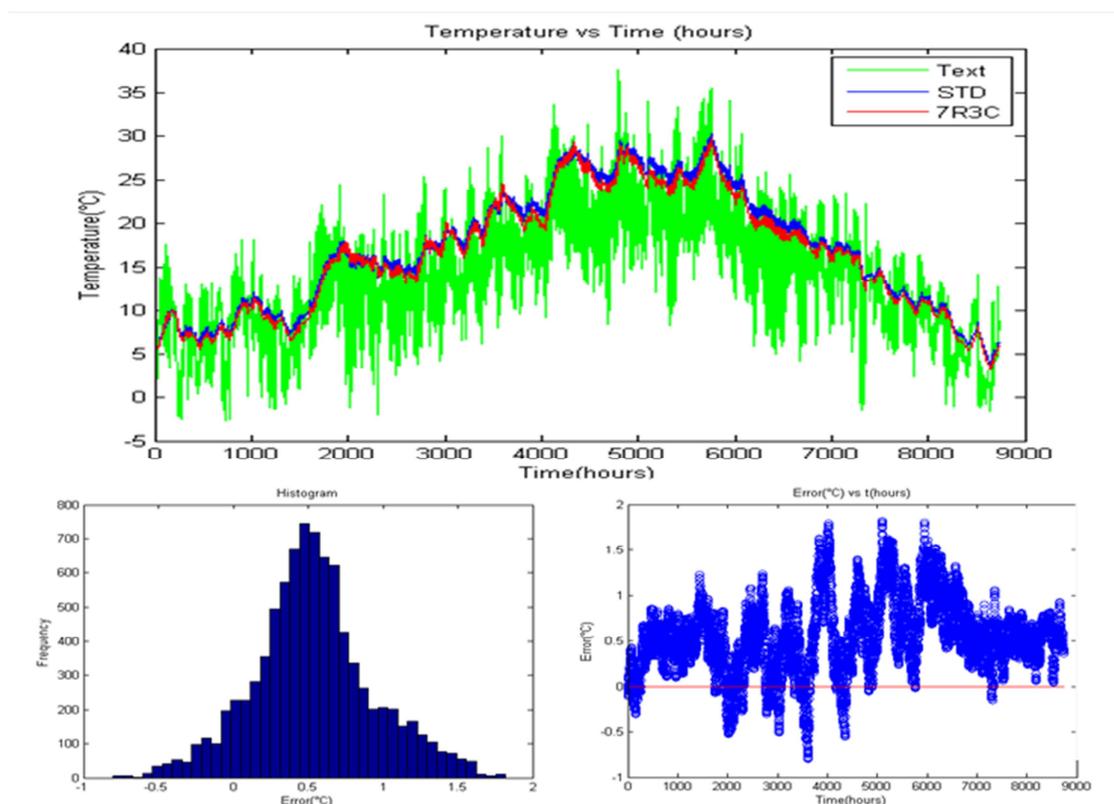


Figure 3 : Confrontation 7R3C - Pléiades sur année type et données statistiques d'écart

En première analyse, on note une assez bonne cohérence des simulations des deux modèles confrontés pour l'ensemble de la période considérée. Le suivi des conditions climatique semble correct, observé depuis la température opérationnelle  $\theta_{op}$ . Il est d'allure fidèle tout au long de l'année, lors même qu'aucune modification paramétrique saisonnière n'est réalisée, ainsi que le mettent en évidence les données statistiques d'écart associées dans la figure 3.

Les écarts instantanés restent modestes, on note une marge de 2,5K au maximum qui est observée essentiellement au cours des périodes de fort ensoleillement et qui se réduit à 1K en hiver. Cette première remarque incite à l'attention concernant la prise en compte du rayonnement solaire dans l'un et l'autre des modèles, sans qu'il fut possible de déterminer lequel a des faiblesses à cet égard.

Bâtiment	MRV-A	MRV-B	MRV-C	MRV-D
Ecart moyen de Température, K	0,6	0,5	0,5	0,4
Ecart type	0,4	0,52	0,63	0,31

Tableau 1 : Ecart entre les simulations Pléiades et 7R3C

La dispersion des erreurs semble statistiquement admissible. L'offset thermique traduit un biais qui n'est guère significatif à ce niveau.

Il semble ainsi que le modèle 7R3C remplit à première vue ses objectifs et peut se prévaloir d'une certaine qualité. Cette opération a été répétée sur les autres bâtiments de la MRV et les résultats confirment les premières constatations. Toutefois, seule la validation expérimentale permettra de conclure.

La même étude a été reproduite, mais cette fois-ci avec prise en compte du chauffage. Cette approche reste toutefois théorique car elle suppose l'implémentation d'un code de commande de chauffage analogue que l'on a pu approcher assez fidèlement, ainsi que le suggèrent les figures 4 et 5 juxtaposées pour leur complémentarité. On y distingue l'allure des évolutions prédites par les deux modèles d'où il ressort une certaine cohérence à première vue.

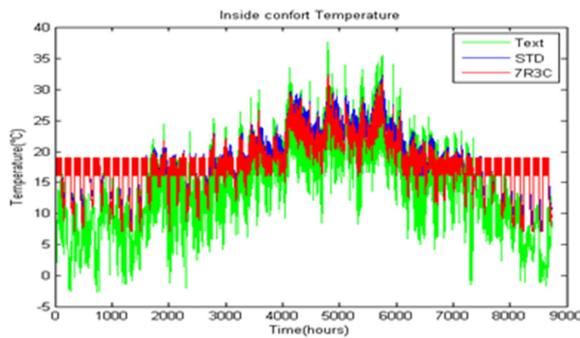


Figure 4 : Confrontation 7R3C - Pléiades sur année type - Suivi Température

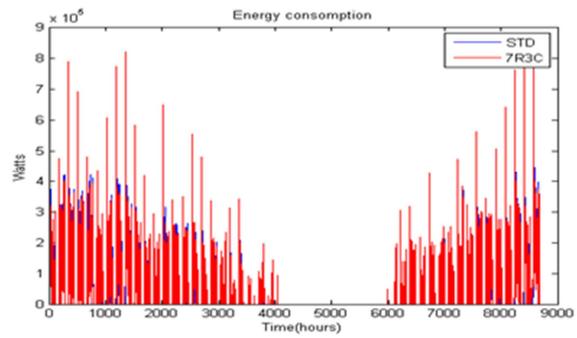


Figure 5 : Confrontation 7R3C - Pléiades sur année type - Suivi consommation

Une observation plus précise est proposée dans la figure 6 qui permet d'apprécier la cohérence de rendu du chauffage. Afin d'affiner l'analyse concernant la cohérence des résultats prédits par les deux méthodes, on effectue un vue de détail sur une période d'une semaine. La figure 6 suivante présente le suivi de la température opérationnelle et le suivi énergétique d'une semaine arbitraire. D'autres semaines ont été observées qui ne présentent pas de singularité particulière par rapport à l'exemple présenté.

On observe clairement l'appel de puissance le lundi matin pour chauffer le bâtiment à 19°C sachant que le week-end la température de consigne est réduite à 7°C; ensuite l'appel de puissance tombe à zéro car la température de consigne pour la nuit est réduite à 16°C; il remonte ensuite pour maintenir le bâtiment à 16°C; enfin l'appel de puissance connaît un nouveau pic au matin, moins important que celui du lundi, pour ramener le bâtiment à 19°C.

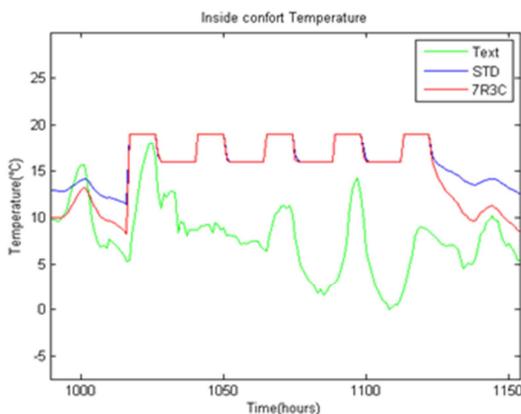


Figure 6 : Confrontation 7R3C - Pléiades sur semaine type - Suivi Température

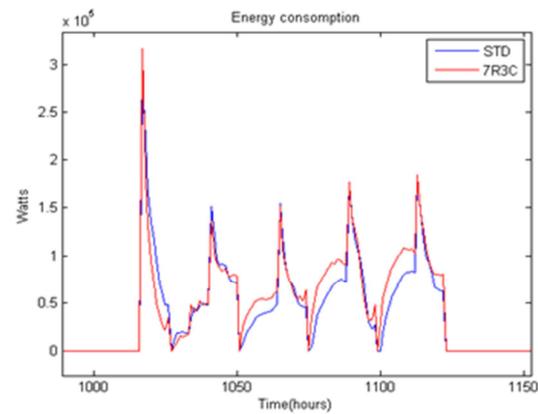


Figure 7 : Confrontation 7R3C - Pléiades sur semaine type - Suivi consommation

En définitive, les dynamiques sont proches mais restent différentes du point de vue de la prévision de consommation, ainsi que le confirme le tableau 2. L'écart est significatif mais dépend largement de l'implémentation du simulateur de chauffage, ainsi qu'il a été précisé au départ.

Bâtiment	MRV-A	MRV-B	MRV-C	MRV-D
Ecart moyen de Température, K	1	0,8	0,6	1
Ecart relatif consommation annuelle, %	28,6	27,4	35,1	17,2

Tableau 1 : *Ecart entre les simulations Pléiades et R7C3*

### 4.3. Validation expérimentale

En définitive, c'est sur ce mode de validation que nous avons concentré nos efforts. En effet, nous disposons de ressources expérimentales correspondant à une période clef de la vie d'un bâtiment (mise en exploitation) et de la capacité d'entreprendre commodément les expériences complémentaires qui pourraient s'avérer nécessaires. D'autre part, les avancées potentielles de nos travaux sont destinées en premier lieu à une application sur notre campus.

La figure 8 présente la confrontation du modèle 7R3C à la réalité pour le bâtiment D. La température expérimentale de référence choisie est celle de retour à la centrale de traitement d'air et ventilation qui semble être la grandeur la plus significative. En effet, il est difficile de déterminer une température de référence unique représentative de l'état de l'air dans le bâtiment à partir de mesures discrètes effectuées dans un certain nombre de locaux. Ces données peuvent servir au bornage d'un domaine de validité et à des évaluations de pertinence en regard d'une température de référence définie comme moyenne pondérée et tout état de cause, cette valeur étalon reste contestable.

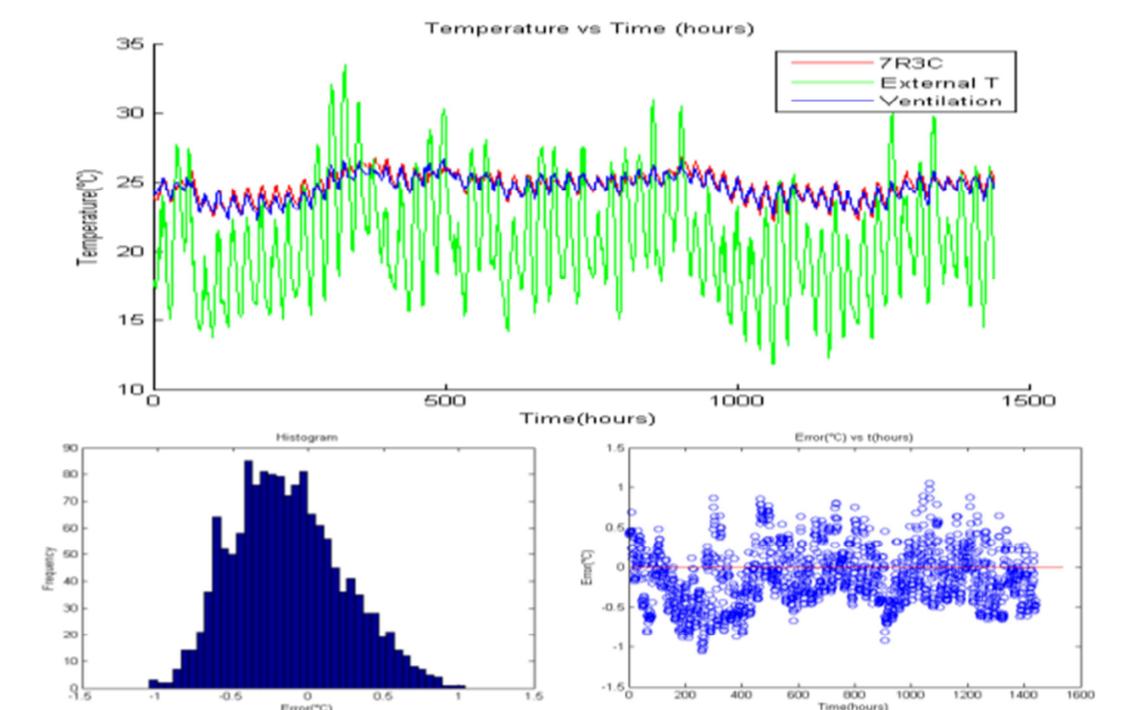


Figure 8 : *Confrontation 7R3C - expérimentation bâtiment D pour la période du 14 Juin au 26 Août 2013 et données statistiques d'écart*

## 5. Conclusion

Nous avons proposé un modèle réduit polyvalent construit par analogie électrique avec 7 résistances et 3 capacités. Il contient une formulation originale du flux d'origine solaire, avec une prise en compte spécifique du type de paroi. Cet apport permet de s'affranchir du recalage saisonnier ordinairement indispensable pour ce type de modèle. Il a été testé et validé à l'aide d'une expérimentation portant sur 4 bâtiments. Le suivi de température donne des résultats satisfaisants, par contre la prédiction de l'énergie nécessaire au chauffage et à la climatisation du bâtiment nécessite encore un certain travail de validation. Ce modèle est destiné d'une part à la prédiction des évolutions thermiques et des consommations des appareillages CVC, mais également à l'optimisation de la conduite de ces équipements. De surcroît, son utilisation pour le repérage de défauts de comportement est en cours de test. L'absence de recalage inter-saisonnier donne également une autre signification au paramétrage du modèle: ces résistances et ces capacités définies une fois pour toute, véhiculent des informations relatives à la performance énergétique de niveau patrimonial qui peuvent s'avérer précieuses dans les arbitrages budgétaires nécessaires qui apparaissent dans cadre de projets de réhabilitations.

## Références

- [1] I. Hazyuk, Chr. Ghiaus, On the physical meaning of minimization criterion for Model Predictive Control IEEE AQTR proceedings, 2010.
- [2] Berthou T., Stabat P., Salvazet R., Marchio D. "Comparaison de modèles linéaires inverses pour la mise en place de stratégies d'effacement" Mines PARITECH - Veolia, Congrès AUGC 2012 Polytech Annecy-Chambéry, 2012, Contribution 1138
- [3] A.P. Ramallo-González, D.A. Coley, Using self-adaptive optimization methods to perform sequential optimization for low-energy building design, Energy and Buildings, Oct.2014, 18–29
- [4] Runming Yao & Jie Zheng; A model of intelligent building energy management for the indoor environment, Intelligent Buildings International, 2:1, 2010, 72-80
- [5] G. Fraisse, C. Viardot, O. Lafabrie, G. Achard, Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy", (LGCH), Energy & Buildings 34, 2002, 1017-1031
- [6] P. Bacher, H. Madsen, Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings, ELSEVIER, Energy & Buildings 43, 2011, 1511-1522
- [7] T. Berthou, P. Stabat, R. Salvazet, D. Marchio, Development and validation of a grey box model to predict thermal behavior of occupied office buildings, ELSEVIER, Energy & Buildings, 2014
- [8] Reynders G, Dirikena J, Saelens D., Quality of grey-box models and identified parameters as function of the accuracy of input and observation signals ", Energy and Buildings 82, 2014, 263-274
- [9] J. Duchatelle, Etude des systèmes et de l'inertie dans la RT 2012 pour le résidentiel, Rapport stage fin d'études INSA Génie Climatique Energétique au COSTIC - Cardonnel Ingénierie, 2011

## Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude au Laboratoire PHASE pour son accueil et soutien, particulièrement au technicien P. de Guibert pour sa compétence et disponibilité, également et par ordre d'apparition dans le projet OptiMEP, au service Patrimoine de l'Université de Toulouse pour l'accueil de nos expérimentations dans leurs locaux et à nos stagiaires C.Alliouz et F.Arendo pour les travaux préliminaires sur les modèles à 1 et 2 capacités, ainsi qu'I. Eguia Otaño et J. Magnier pour leur compétence et leur collaboration active qui ont contribué efficacement à l'avancement du projet et à la validation du modèle à 3 capacités.