

Couplage d'un modèle thermique issu de COMFIE avec un chauffage régulé électriquement pour une simulation temporelle hybride à pas variable

Sana GAALOUL¹, Benoît DELINCHANT¹, Frédéric WURTZ¹, Stéphane THIERS², Bruno PEUPORTIER²

¹ G2Elab – LABoratoire de Génie Electrique de Grenoble

ENSE3 : 961, Rue de la Houille Blanche, 38402 Saint Martin d'Hères,

sana.gaaloul@g2elab.grenoble-inp.fr, benoit.delinchant@g2elab.grenoble-inp.fr, frederic.wurtz@g2elab.grenoble-inp.fr

² ARMINES – Centre Energétique et Procédés

MINES ParisTech : 60, Boulevard Saint-Michel, 75272 Paris CEDEX 06.

stephane.thiers@mines-paristech.fr, bruno.peuportier@mines-paristech.fr

RESUME. Le but de cet article est de présenter le couplage réalisé entre un modèle thermique de bâtiment construit à partir du logiciel COMFIE et un modèle de chauffage dans MATLAB/Simulink. Il s'agit d'une interopérabilité entre deux domaines régis par des phénomènes de natures différentes : continu pour la thermique et événementiel pour la régulation du chauffage, le tout interagissant de manière fortement couplée. La simulation par pas variable assure une bonne gestion de cette hybridation et permet de simuler rapidement les températures en tenant compte d'une manière précise de l'occurrence des événements dus au système de contrôle. Cette étude se fait dans le cadre de la nécessité de coupler des modèles thermiques (COMFIE) et électriques (cf. régulation chauffage) dans la perspective de simulation des bâtiments BBC et à énergie positive : ceci nécessitant de gérer des problèmes d'interopérabilité entre environnements.

MOTS-CLÉS : Couplage, Simulation thermique, Régulation, Simulation hybride, Simulation à pas variable.

ABSTRACT. The purpose of this article is to introduce the coupling accomplished between a thermal model of building constructed from COMFIE software and a model of heating in MATLAB / Simulink. It is about interoperability between two domains governed by phenomena of different natures: continuous domain for thermal and event driven for heating control, both interacting in a strongly coupled way. The simulation using variable step ensures an efficient hybridization and offers a faster simulation of the temperatures taking into account the events due to the control system. This study is done in the context of coupling thermal models and electrical models in order to efficiently simulate low energy and positive energy buildings, which requires managing interoperability problems between simulation environments.

KEYWORDS: Coupling, Thermal simulation, Regulation, Hybrid simulation, Variable step simulation.

1. INTRODUCTION

Le bâtiment est un secteur faisant cohabiter plusieurs domaines : thermique, électrique, contrôle-commande, qui interagissent ensemble de manière faible ou forte. Ainsi, l'amélioration de ses performances énergétiques en vue de la réduction de sa consommation exige de tenir compte de tous ces phénomènes et de leurs différentes interactions. Or, ces derniers sont caractérisés par des constantes de temps différentes et des natures différentes pouvant être continus, discrets ou événementiels. Le couplage entre ces domaines nécessite de tenir compte de cette variété.

Au niveau international, les deux environnements de simulation du bâtiment les plus complets sont EnergyPlus et TRNSYS (Crawley *et al.*, 2005). Ils permettent de coupler un modèle de l'enveloppe aux modèles des équipements issus de leurs bibliothèques. L'intégration de nouveaux modèles dans ces outils s'avère une tâche lourde qui requiert de l'utilisateur des efforts de développement.

Des outils plus conviviaux ont également été développés au niveau national, par exemple le logiciel COMFIE et son interface utilisateurs PLEIADES (Salomon *et al.*, 2005), plus accessible aux professionnels car moins coûteux en temps de saisie et d'apprentissage. Ce logiciel, permet de définir le modèle d'enveloppe avec la prise en compte d'un grand nombre de paramètres (conditions météorologiques, nature des parois...) et de réaliser une simulation détaillée. Cependant, COMFIE, comme plusieurs outils de thermique, présente des limitations aux utilisateurs car il ne lui permet pas d'ajouter ses propres modèles ou de tester des algorithmes de commande des équipements. Bien que des développements dans COMFIE soient possibles pour y remédier, nous allons montrer ici comment, grâce à l'interopérabilité des modèles, nous pouvons réutiliser COMFIE avec d'autres environnements, et en particulier des environnements couramment utilisés dans le domaine électrique et du contrôle commande (typiquement MATLAB-simulink).

En vue de profiter des capacités de COMFIE pour la modélisation de l'enveloppe, et de dépasser ses limites en matière de simulation de la régulation des systèmes, on a procédé à une externalisation de la résolution séquentielle du système différentiel calculé par le cœur de COMFIE. Pour atteindre cet objectif, COMFIE doit fournir à l'utilisateur les données qui lui permettront d'alimenter un solveur situé sur une autre plateforme logicielle. Par projection de ce système dans Matlab/Simulink, très utilisé pour le contrôle-commande, nous pouvons le coupler aisément à plusieurs équipements. L'objectif ici est d'étudier le couplage entre un modèle thermique construit à partir de COMFIE et un modèle de chauffage régulé gérant la puissance électrique (Figure 1).

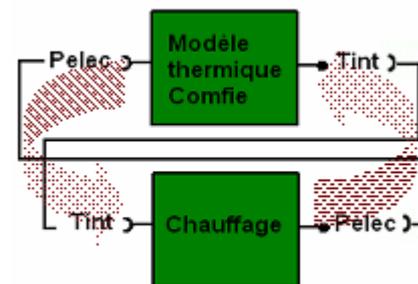


Figure 1 : Couplage du modèle thermique et du modèle de chauffage régulé

2. LE MODÈLE THERMIQUE ISSU DE COMFIE

COMFIE est un logiciel conçu en vue de calculer les performances thermiques des bâtiments multi-zones, en se basant sur une analyse modale permettant de réduire le temps de simulation (Peuportier *et al.*, 1990).

La constitution du modèle du bâtiment dans ce logiciel est menée tout d'abord pour chaque zone thermique indépendamment des autres zones en se basant sur les équations d'échange thermique établies pour chaque maille élémentaire de la zone étudiée. Les parois sont donc décomposées en mailles dont le bilan thermique établi au niveau de chaque maille, conduit au système matriciel

$$\text{formalisé ainsi : } \begin{cases} C \cdot \dot{T} = A \cdot T + E \cdot U \\ Y = J \cdot T + G \cdot U \end{cases} \quad [1]$$

T : champ discrétisé des températures des mailles

U : vecteur des sollicitations

Y : vecteur des sorties (température de la zone, températures équivalentes éventuelles)

- C : matrice diagonale des capacités thermiques
- A : matrice contenant les termes d'échange entre mailles
- E : matrice contenant les termes d'échange entre mailles et sollicitations
- J : matrice reliant les sorties aux températures des mailles
- G : matrice reliant les sorties aux sollicitations

Après une linéarisation autour du point d'équilibre dynamique et un changement de base simplifiant le modèle, le système est réduit par une technique d'analyse modale (Bacot 1984). En effet, certaines constantes de temps sont petites, et les termes correspondants du vecteur d'état atteignent très rapidement leur régime permanent. On peut alors les négliger dans le calcul en ne prenant en compte que les constantes de temps les plus significatives.

Suite à cette étape, les équations décrivant chaque zone sont couplées pour former un système global (notation g) représentant la totalité du bâtiment de la forme :

$$\begin{cases} \dot{X}_g &= F_g \cdot X_g + B_g^\alpha \cdot \dot{U}_g + B_g^\beta \cdot \dot{Y}_g \\ Y_g &= H_g \cdot X_g + S_g^\alpha \cdot U_g + S_g^\beta \cdot Y_g \end{cases} \quad [2]$$

U_g : vecteur des sollicitations,

X_g : vecteur d'état

Y_g : vecteur des sorties contenant les températures équivalentes, et les variables de couplage

$F_g, B_g^\alpha, B_g^\beta, H_g, S_g^\alpha, S_g^\beta$: matrices résultant des diverses manipulations mathématiques.

Ce système peut alors être intégré sur un pas de temps Δt , ce qui permet d'obtenir les valeurs de X_g et Y_g au temps $(n+1)\Delta t$, notées X_g^{n+1} et Y_g^{n+1} , en fonction des valeurs X_g^n et Y_g^n au temps $n\Delta t$ (méthode récursive). On note de même U_g^{n+1} et U_g^n les vecteurs des sollicitations aux temps $(n+1)\Delta t$ et $n\Delta t$. Le système [2] devient après intégration :

$$\begin{cases} X_g^{n+1} = \exp(F_g \cdot \Delta t) \cdot X_g^n + W_g^\alpha \cdot (U_g^{n+1} - U_g^n) + W_g^\beta \cdot (Y_g^{n+1} - Y_g^n) \\ Y_g^{n+1} = MGIF \cdot X_g^n + MGIE \cdot U_g^{n+1} + MGID \cdot U_g^n - MGIC \cdot Y_g^n \end{cases} \quad [3]$$

$W_g^\alpha, W_g^\beta, MGIF, MGIE, MGID, MGIC$: matrices résultant de l'intégration

La résolution de ce système permet l'évaluation des températures intérieures des différentes zones à chaque pas de temps, pour des scénarios prédéfinis d'apports internes.

3. LE MODÈLE DE BASE DU CHAUFFAGE

Le dispositif de chauffage modélisé fonctionne en tout ou rien suivant deux régimes: régime pleine puissance (P_{chauff}) en marche et régime puissance nulle en extinction. C'est le cas de la plupart des convecteurs électriques contrôlés par un thermostat. Son thermostat fonctionne en hystérésis : pour éviter le basculement rapide, la température à laquelle il « bascule » d'un état à un autre, n'est pas la même selon que la température est en train de monter ou de descendre (fig 2).

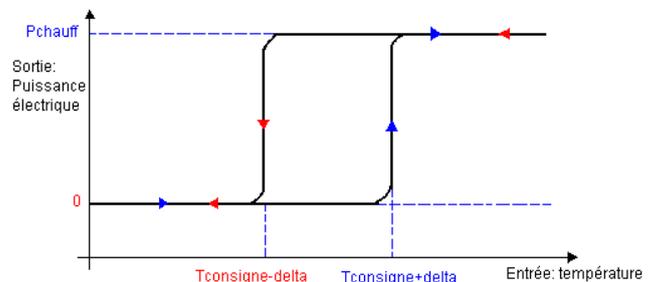


Figure 2 : Le principe de la commande du chauffage avec hystérésis

4. LE COUPLAGE DANS MATLAB (MODÈLE RÉCURSIF) :

4.1. PROJECTION DU MODÈLE DANS MATLAB ET VALIDATION

Dans un premier temps, le modèle thermique utilisé pour réaliser le couplage correspond à la reconstruction du système [3] dans le logiciel MATLAB, à partir des matrices générées par COMFIE. MATLAB étant choisi pour ses performances en calcul matriciel ainsi que sa facilité de prototypage, mais essentiellement pour ses capacités de simulation temporelle de systèmes hybrides de contrôle-commande. Cette projection a été validée en comparant les résultats de variation des températures des zones obtenues avec COMFIE et avec le programme MATLAB de projection, pour le même projet (les maisons INCAS installées à Chambéry) (fig 3).

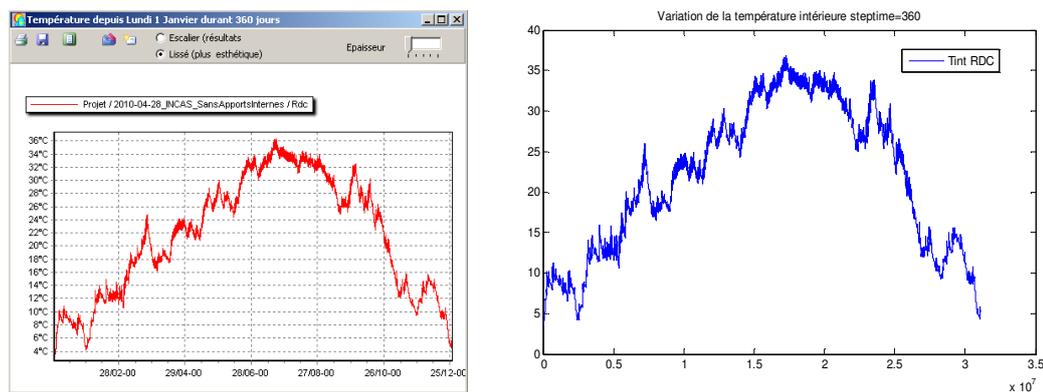


Figure 3 : Variation des températures simulées dans COMFIE (gauche) et dans MATLAB (droite)

4.2. LE PRINCIPE DU COUPLAGE

Le vecteur de sollicitation U décrit précédemment est formé à partir des sollicitations subies par le bâtiment : la température extérieure, les puissances internes dissipées dans chaque zone (apport internes des usagers et des appareils), les flux solaires incidents sur les parois.

Dans le cas d'une zone thermique chauffée, la puissance de chauffage est injectée dans le vecteur U dès la détection du dépassement du seuil de mise en marche pour en tenir compte dans le calcul de la température.

4.3. SIMULATION ET RÉSULTATS AVEC UN PAS DE SIMULATION FIXE

Dans un premier temps, le pas de simulation est fixé selon le modèle thermique de l'enveloppe. Un pas d'une heure est suffisant pour simuler le comportement de l'enveloppe, de plus les données météorologiques disponibles (températures extérieures et flux solaires) sont des données horaires.

On peut ainsi visualiser la variation de la température intérieure des différentes zones et vérifier la stratégie de régulation adoptée (fig 4). Après une phase transitoire, la température se stabilise autour de la température de consigne (ici 10° : valeur choisie en vue de faire des comparaisons avec des résultats ultérieures et qui sera justifiée plus tard) grâce à la régulation du chauffage.

L'état du chauffage n'est mis à jour qu'à chaque pas de simulation ce qui correspond dans ce cas à une heure. Ceci ne traduit pas suffisamment précisément la réalité du comportement du système de chauffage et ainsi du comportement thermique de la maison, ce qui n'est pas acceptable.

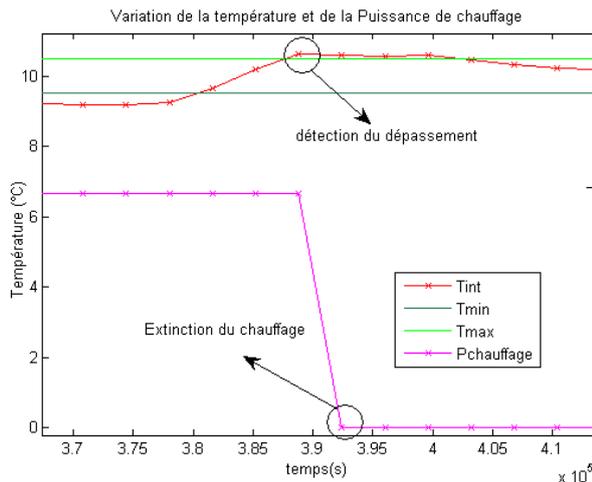


Figure 4 : Variation de la température et de la puissance du chauffage (pas 1h) dans MATLAB

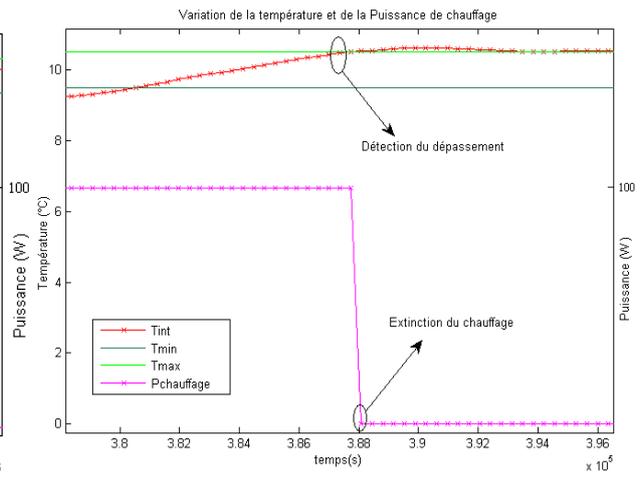


Figure 5 : Variation de la température et de la puissance du chauffage (pas 6min) dans MATLAB

Afin de remédier à ce problème, le pas de simulation peut être réduit à un pas adapté au système de chauffage (6 minutes par exemple : le pas de simulation minimal dans COMFIE). Ce qui permettra d'améliorer les résultats, lisser les courbes des variations des températures et avoir plus de précision étant donné que les dépassements sont détectés plus tôt comme on peut le voir sur la figure 5. En contre-partie, on perd en temps de calcul surtout lorsque aucun événement de régulation n'intervient (on passe de 0.63 s à 1.23 s en temps de calcul).

Il est donc indispensable de procéder à des simulations à pas variable permettant d'adapter le pas de calcul selon la dynamique du système. Afin d'exploiter les capacités des solveurs de MATLAB/Simulink (MathWorks web), le modèle thermique doit être représenté sous la forme d'un système différentiel [2], donnant les mêmes résultats que le système [3], implémenté dans une « S-Function » de Simulink. Une « S-fonction » est une description sous un langage informatique (Matlab, C, C++, Fortran, Ada) d'un block Simulink utilisant une syntaxe d'appel spécifique permettant d'interagir avec le solveur d'équations. Le système [2] est générique pour un problème donné et ne dépend pas du pas de simulation utilisé, contrairement au système [3] généré pour un pas de temps spécifique.

5. COUPLAGE DANS SIMULINK : APPROCHE SYSTÈME D'ÉTAT

5.1.1. Adaptation du modèle thermique : modèle dynamique

Le système [2] n'est pas sous la forme d'un système d'état classique. En effet, il présente des dérivées temporelles du vecteur de sortie Y et du vecteur de sollicitations U . Il a donc fallu le transformer par un changement de variable $Z = X - B^\beta \cdot Y$ pour faire disparaître le vecteur \dot{Y} . On

obtient alors le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{Z}_g = F_g \cdot Z_g + B_g^\alpha \cdot \dot{U}_g + F_g \cdot B_g^\beta \cdot Y_g \\ Y_g = (Id - S_g^\beta + H_g \cdot B_g^\beta)^{-1} \cdot (H_g \cdot Z_g + S_g^\alpha \cdot U_g) \end{cases} [4]$$

Dans ce nouveau système subsiste la dérivée du vecteur des sollicitations, ce qui le rend sensible aux variations des sollicitations. La température extérieure et les flux solaires incidents ayant des variations faibles entre deux pas de calcul, ils ne perturbent pas la résolution, contrairement aux puissances internes dues à la puissance dégagée par le chauffage. En effet, lors d'un dépassement du seuil de température la puissance varie brusquement ce qui perturbe la variation de la température

(fig 6). Plus la puissance de chauffage est élevée, plus le système est perturbé. Dans la suite, et dans le but de réduire les oscillations du système pour pouvoir étudier les phénomènes dus au couplage, une puissance de chauffage réduite a été choisie pour la régulation ($P_{chauff} = 100W$, $T_{consigne} = 10^{\circ}C$).

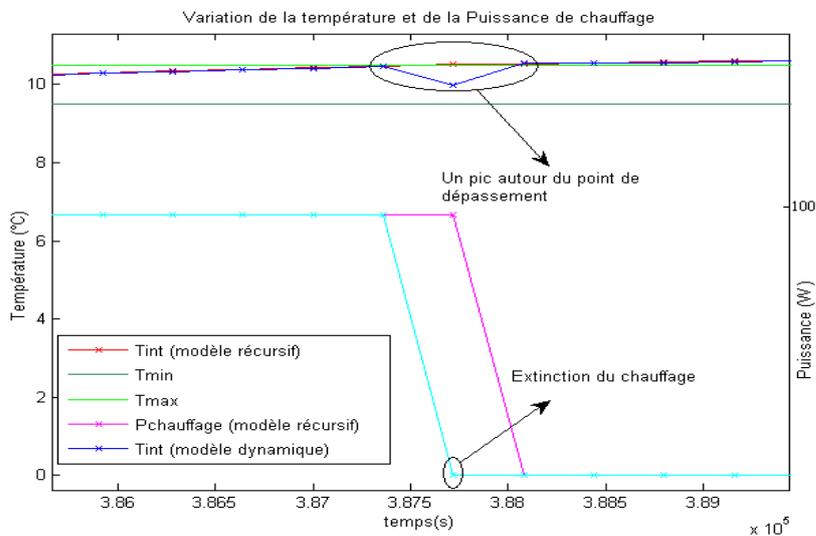


Figure 6 : Variation de la température et de la puissance de chauffage dans Simulink (6min)

Les deux courbes simulées pour les deux systèmes [3] et [4] avec le même pas de temps (6 min) ont tendance à se superposer sur la totalité de la période de simulation sauf au moment du changement de la consigne du chauffage. On observe des pics de température sur la courbe de température du modèle dynamique lorsque le chauffage bascule d'un état à l'autre, ce qui est dû à la différence importante des sollicitations entre deux calculs consécutifs. L'accumulation de ces erreurs peut conduire à des résultats totalement divergents au bout d'un certain temps de simulation. Le temps de simulation a légèrement augmenté (2.01 s). Ceci étant dû au fait que Simulink utilise des solveurs génériques non dédiées à des applications spécifiques et font appel à plusieurs fonctions durant la résolution, contrairement au programme MATLAB où on la résolution effectuée est spécifique au problème étudié.

5.1.2. Adaptation du modèle de chauffage

Afin d'améliorer la simulation numérique et réduire les pics de température, nous avons affiné le modèle du chauffage par l'introduction de constantes de temps thermiques (figure 7). Ces constantes sont négligeables par rapport à celles du bâtiment mais elles sont indispensables pour assurer une bonne simulation numérique. Elles permettent notamment de supprimer des valeurs infinies de \dot{U} lorsque le chauffage commute. Les constantes de temps sont calculées en fonction de la puissance du chauffage (liée à la capacité thermique du système de chauffage).

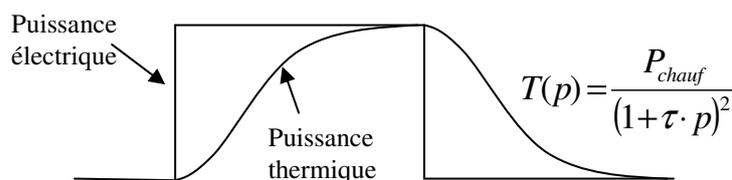


Figure 7 : Modèle du chauffage

Le schéma complet du couplage réalisé dans Simulink est présenté dans la figure 8.

Ce modèle a stabilisé le système qui présente moins d'oscillations (courbe plus lisse : fig 9) même avec des puissances élevées pour un réglage autour des températures plus élevées (22°). Cependant, le temps de simulation a augmenté pour passer à 5.8s étant donné que le solveur utilisé précédemment, se basant sur la méthode d'Euler, n'a pas permis de suivre les variations du système. Il a donc fallu choisir un nouveau solveur utilisant la méthode de Dormand et Prince (Dormand *et al.*, 1980) : il est plus coûteux en temps de simulation car il est d'ordre supérieur mais il garantit plus de précision.

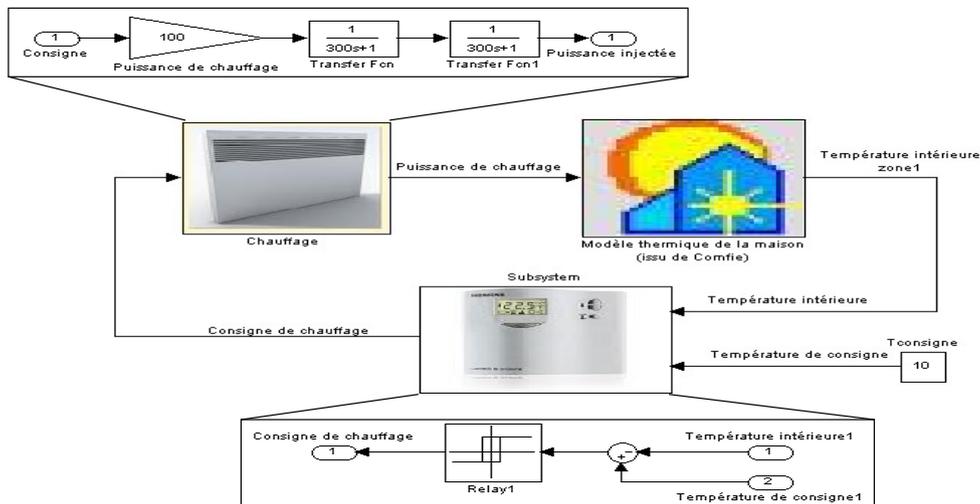


Figure 8 : Schéma de la simulation

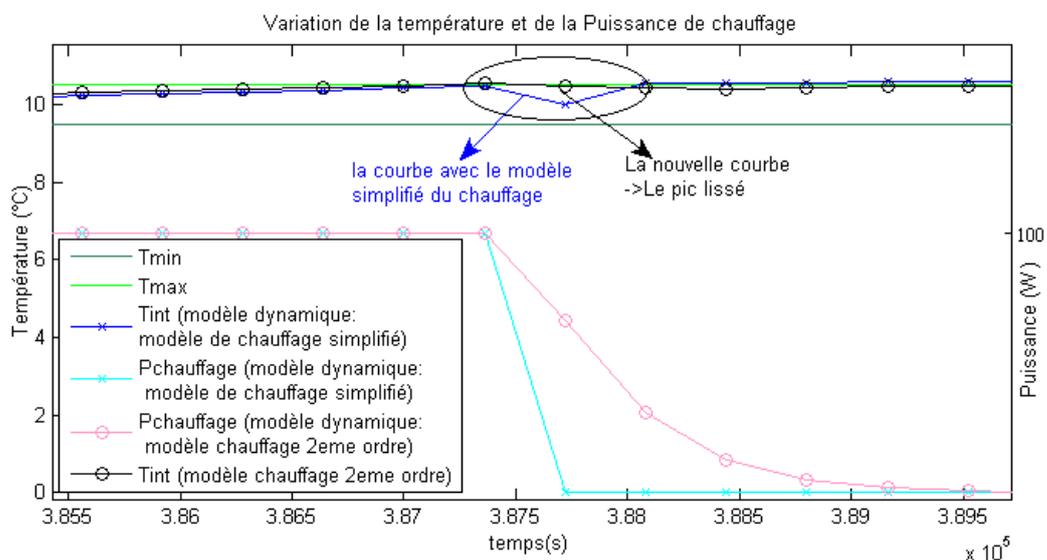


Figure 9 : Variation de la température et de la puissance de chauffage avant et après l'adaptation du modèle de chauffage (6 min) dans Simulink

La stabilité du système est améliorée (fig 9), mais toujours avec un pas de temps constant et faible, ce qui est coûteux en temps pour simuler des journées voire des années pour l'estimation des besoins et des consommations énergétiques. Donc, il faut optimiser au mieux les temps de calcul en adaptant le pas de simulation selon la dynamique du système.

5.1.3. Simulation à pas variable

La plupart des systèmes étudiés en génie électrique sont des systèmes hybrides, contenant à la fois des variables d'états continues et discontinues. Donc la simulation doit être apte de traiter les différentes discontinuités et s'assurer de la continuité des variables d'état à chaque changement d'état et trouver un compromis entre temps de calcul et précision. Une méthode à pas fixe donne une précision de l'ordre du pas de calcul (Paul 1999) ce qui revient à diminuer au minimum le pas de simulation pour atteindre la précision désirée. Pour améliorer la qualité de la simulation sans effectuer beaucoup de calculs, l'adaptation du pas s'avère une solution pertinente.

Après l'adaptation du système thermique et du système de chauffage, le passage au pas variable a été réalisé ce qui a amélioré le temps de simulation par rapport à la simulation précédente : il atteint 2.21 s pour un pas variant entre 6min (le pas utilisé précédemment) et 1h (le pas maximal de simulation COMFIE). Pour la suite (fig 10), le pas minimal est fixé à 1s (le pas maximal est toujours 1h), l'ordre de grandeur des constantes de temps électriques pour valider l'efficacité de la méthode de résolution adoptée dans la simulation du couplage thermique avec d'autres équipements électriques (des constantes de temps différentes) et non seulement le chauffage.

On observe sur la figure 10 que le solveur travaille au pas maximal sur la quasi totalité de la simulation et le réduit lors de la détection de variation de la dynamique du système et particulièrement lors des commutations du chauffage (fig 10).

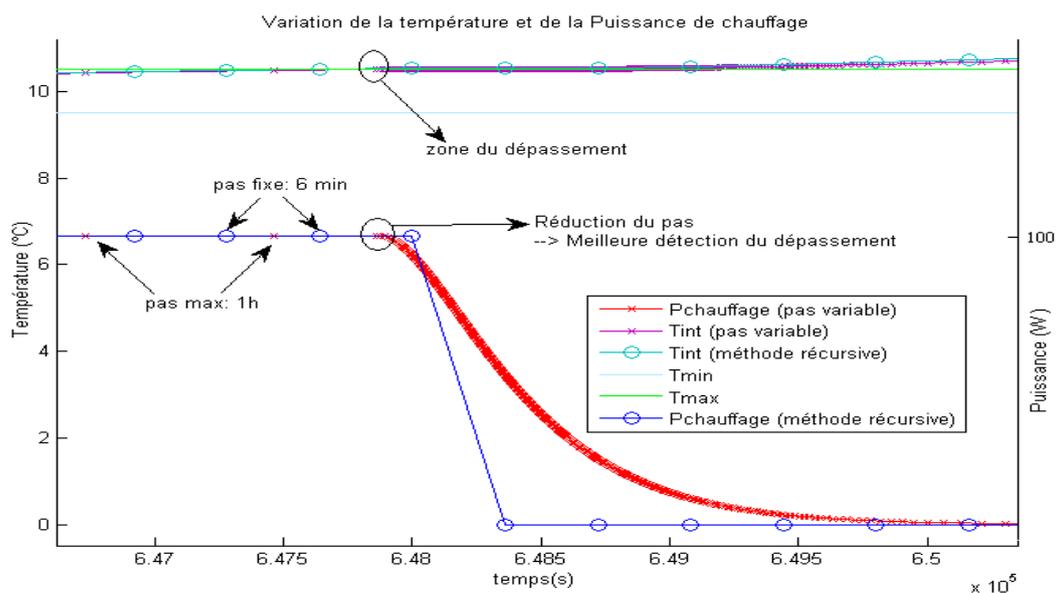


Figure 10 : Variation de la température et de la puissance de chauffage du modèle récursif (6min) et le modèle dynamique (pas variable 1s->1h)

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES :

L'étude menée montre la pertinence d'exploiter les modèles issus de logiciels de modélisation comme Comfie dans d'autres environnements pour y être couplés avec d'autres modèles et la nécessité d'introduire des constantes de temps thermiques aux équipements électriques pour pouvoir simuler leurs influences sur les variations des températures. Cette étude a également mis en évidence les difficultés liées aux problématiques de simulation dynamique hybride. Avec en premier lieu la

nécessité de mise sous une forme standardisée telle qu'un système différentiel explicite. Et en second lieu la gestion du pas de temps lorsqu'il s'agit de dynamiques plus ou moins lentes couplées à des événements. La suite de ces travaux mènera au couplage d'équipements électriques et thermiques plus complexes avec l'introduction de modèles d'acteurs dont la modélisation et/ou la simulation dans Simulink s'avère délicate. L'introduction du langage de modélisation Modelica (Fritzson *et al.*, 1998) et la projection dans des normes de composants logiciels seront étudiées.

7. RÉFÉRENCES :

- Bacot.P (1984) « Analyse modale des systèmes thermiques », Thèse de doctorat, Université Paris VI.
- Crawley D., J. Hand, Kummert M., Griffith G.(2005) « Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs Version 1.0 », United-States Department of Energy, University of Strathclyde, and University of Wisconsin.
- Dormand, J. R., Prince, P. J. (1980) «A family of embedded Runge-Kutta formulae», *Journal of Computational and Applied Mathematics* 6, p 19-26.
- Fritzson Peter, Engelson Vadim (1998) «Modelica-A unified object-oriented language for system modeling and simulation», *Object Orienting Programming*, Vol 1445, p 67-90.
- Mathworks, choosing a solver: <http://www.mathworks.cn/access/helpdesk/help/toolbox/simulink/ug/f11-69449.html>
- Normand O., Catellani S., Champenois G. (1991) « Use of simulation in failure detection on diagnosis of an electromechanical system» *EPE'91*, p 4.301-4.305.
- Paul C.A.H « The treatment of derivatives discontinuities in differential equations,» Numerical analysis report, Manchester Centre for Computational Mathematics, Department of Mathematics, 1999.
- Peuportier B., Blanc-Sommereux I. (1990) « Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings» *International Journal of Sustainable Energy*, vol 8, issue 2, p. 109–120.
- Press W.H, Teukolsky, Wetterling W.T, Flannery B.P. «Numerical Recipe in C: the art of scientific computing», ISBN 0-0521-431-08-5.
- Salomon T., Mikolasek., Peuportier.B. (2005) «Outil de simulation thermique du bâtiment, Comfie » *Journée thématique SFT-IBPSA*