

Développement d'un simulateur numérique de système de cogénération couplé à un bâtiment.

Stanislas BROU^{1,2*}, Frédéric JOLY¹, Alain NEVEU¹, Vincent ARTIGUE²

¹Laboratoire de Mécanique et d'Energétique d'Evry
40 rue du Pelvoux CE1455 Courcouronnes 91020 Evry Cédex FRANCE

²ENS2R

49 rue de Corbeille, Epinay sur Orge 91360 FRANCE

* (auteur correspondant : s.brou@iut.univ-evry.fr)

Résumé - Les systèmes de mini/micro-cogénération utilisant des énergies renouvelables représentent une solution de choix pour le secteur du bâtiment, tant sur le plan énergétique que sur le plan environnemental. A l'instar des nombreux travaux de recherche et développement qui y sont consacrés, nous développons, en association avec la société ENS2R (programme de recherche Batimac), un simulateur de comportement énergétique de système de cogénération couplé au bâtiment. Cet outil d'aide au choix doit être rapide, précis et permettre de dimensionner et d'évaluer les performances du système Batimac.

L'environnement Matlab&Simulink, est un outil adapté pour ce type de développement, où le simulateur est vu comme un ensemble de composants couplés. Ainsi, plusieurs types de modèles cohabitent dans le simulateur. A titre d'exemple, les ballons de stockage thermique sont modélisés en volumes finis, la machine à absorption est obtenue par un modèle phénoménologique enfin, les modèles fortement maillés comme celui du bâtiment muni d'un plancher chauffant réversible et du système de stockage avec matériau à changement de phase font l'objet d'une réduction de modèle par analyse modale.

Dans des communications précédentes, nous avons décrit le principe du simulateur [1] et mis en évidence l'utilité de la réduction modale [2]. Nous présenterons cette fois nos premiers résultats obtenus en utilisant la version finale du simulateur Batimac. Pour ce faire, après une brève description du modèle numérique du système Batimac et de sa charge, nous étudierons, pour une configuration définie, sa performance énergétique à travers des critères tels que l'économie d'énergie primaire et le rendement global et l'efficacité globale (rendement de la production à la consommation via le réseau de distribution). Puis, pour une stratégie de fonctionnement choisie, nous vérifierons la capacité de ce système à satisfaire aux objectifs en matière de chauffage, rafraîchissement, fourniture d'eau chaude sanitaire et d'électricité.

[1] S. Brou, F. Joly, K. Gokpi, A. Neveu & V. Artigue, Modélisation et simulation d'un système énergétique pour bâtiment autonome en énergie, *Conférence IBPSA France-Arras* (2014).

[2] B. Gaume, S. Brou, F. Joly & A. Neveu, Réduction modale d'un plancher chauffant. *Congrès SFT France-Lyon* (2014).

1. Introduction

En 2013, la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment était estimée à 44.8% avec une part d'émission de CO₂ à 24.6%, faisant de ce secteur le premier consommateur d'énergie et le deuxième émetteur de gaz à effet (GES) de serre anthropique en France. Par ailleurs, le contexte énergétique et environnemental actuel marqué respectivement par une augmentation globale du coût de l'énergie et le changement climatique, pousse les pouvoirs publics à mettre en œuvre des politiques de maîtrise de l'énergie. Le secteur du bâtiment représente sans aucun doute le plus grand gisement d'économie d'énergie et par conséquent un secteur non négligeable dans la réduction des GES. Ainsi, le recours aux énergies renouvelables constitue une excellente alternative. Mieux encore, l'utilisation des systèmes énergétiques utilisant des énergies renouvelables constitue une solution de choix, puisque l'énergie thermique et électrique sont produites sur place et ce avec des énergies renouvelables.

La conception d'un tel système fait l'objet du projet de recherche Batimac piloté par la société ENS2R. Batimac est un système de micro-tri-génération modulaire dont le but est de satisfaire aux demandes énergétiques d'un bâtiment donné. Complexe de par le nombre de composants et d'interactions (voir Figure 1), le dimensionnement, l'étude de performance ou encore des études paramétriques du système Batimac ne sont envisageables que par simulations dynamiques. C'est pourquoi, nous développons dans l'environnement Simulink un simulateur numérique de comportement énergétique de cette installation, couplée à une charge. Chaque composant étant modélisé par le modèle le plus adapté en terme de précision et de temps de calcul, plusieurs types de modèles (analytiques, numériques, modaux, réduits, thermodynamiques) cohabitent dans le simulateur.

La première partie de cette communication fera l'objet d'une brève présentation du système Batimac et de la modélisation des principaux composants. Les parties suivantes permettront au lecteur de se familiariser au simulateur Batimac qui sera utilisé dans la dernière partie pour l'évaluation du système à travers des critères tels que l'économie d'énergie primaire et le rendement global d'une part et sa capacité à satisfaire aux objectifs définis par la stratégie de fonctionnement donné.

2. Présentation du système Batimac

Batimac doit pouvoir à partir de biomasse et/ou du rayonnement solaire produire de l'électricité, de la chaleur et du froid afin de répondre intégralement aux besoins énergétiques du bâtiment.

En s'aidant de la Figure 1, les lignes ci-dessous, expliquent comment s'effectue ce processus de production et conversion d'énergie. De l'air à très haute température (275 à 450 °C) est produit par la centrale solaire (a) et/ou le générateur d'air chaud (b), puis acheminé vers la tête chaude du convertisseur (d) qui transforme une partie de l'énergie thermique reçue en travail (puis en électricité) et le reste est évacué sous forme de chaleur à la tête froide du moteur.

L'énergie électrique ainsi produite peut être autoconsommée dans le bâtiment (g) ou commercialisée. L'énergie cédée à la tête froide de (d) est valorisée à travers la production d'eau glacée via la machine à absorption (f), la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et d'eau pour le chauffage afin de répondre aux besoins thermique de (g). La chaleur restante, qui n'a pas pu être stocké dans l'unité de stockage basse température (e) est rejetée dans la nature par l'aéroréfrigérant (h).

3. Modélisations des principaux composants du système Batimac

La partie précédente a permis de se familiariser au système Batimac en mettant évidence les divers composants qu'il comporte. Bien que tous distincts, nous essayerons de les regrouper en fonction de la typologie de modèle utilisée pour les représenter dans le simulateur. Notons par ailleurs qu'ici, c'est le comportement énergétique du système qui nous intéresse avant tout.

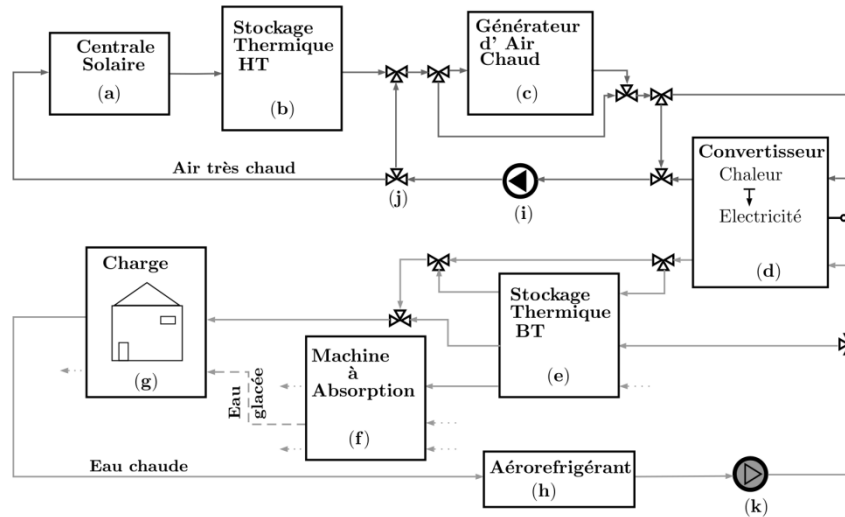


Figure 1 : Synoptique du système Batimac

3.1. Modèles analytiques

Le composant (c) peut être considéré comme une chaudière qui brûle tout type de biomasse solide. Ainsi, son comportement thermique va être modélisé par une équation de bilan d'énergie. C'est aussi le cas du moteur à air chaud (d), où à partir de courbes de rendement et des conditions environnantes il est possible de déterminer la quantité d'énergie électrique produite. L'introduction d'un paramètre d'inertie permet d'approcher le comportement de ces équipements lors de la phase de démarrage.

3.2. Modèle thermodynamique

Malgré la complexité de la machine à absorption simple effet (f), il est possible d'approcher son comportement énergétique à partir d'une analyse thermodynamique [3]. Afin de s'assurer que ce type de modèle est représentatif, nous avons comparé dans [1] des séquences de résultats issus du modèle de (f) au progiciel Thermoptim et à des modèles disponibles dans la littérature, avant de l'intégrer dans le simulateur.

3.3. Modélisation par les méthodes numériques classiques

Contrairement aux modèles précédents, les composants (a) et (e) font l'objet d'une discrétisation spatiale afin d'affiner les modèles.

Pour prendre en compte la stratification thermique dans le stockage basse température (considéré comme un ballon d'eau chaude), le comportement de (e) est approché par une équation de diffusion-transport en une dimension (modèle par tranche). Une attention particulière a été portée sur la possible inversion du gradient, et résolu par l'algorithme du mix [11]. Le modèle numérique ainsi obtenu a été validé par confrontation aux résultats de [4].

La centrale solaire est modélisée comme un tube absorbeur dans lequel circule un fluide caloporteur. Des corrélations disponibles dans la littérature permettent d'estimer le rendement entre l'énergie solaire reçue par le champ de capteur et l'énergie thermique fournie à l'absorbeur. L'évolution dynamique de la température du fluide caloporteur est estimée en discrétisant l'équation de la chaleur par volumes finis en une dimension.

La simulation de ces composants modélisés en 1D n'étant pas chronophage, les méthodes numériques classiques sont compatibles avec les objectifs fixés en terme de temps de calcul.

3.4. Modélisation des composants fortement maillés

Si l'utilisation des méthodes numériques classiques ne pose pas de problème particulier pour la modélisation des composants (a) et (e) puisque modélisés en une dimension, ce n'est pas le cas lorsqu'il s'agit de modéliser des équipements géométriquement plus complexes. En effet, la modélisation du composant (b) ou du bâtiment équipé d'un plancher chauffant requiert un maillage au minimum en deux dimensions, et relativement raffiné. Le problème numérique qui en découle est donc de grande taille. La notion de matrices creuses étant indisponible dans l'environnement *Simulink*, la résolution d'un problème d'ordre élevé s'avère couteuse en temps de calcul. Dès lors, il n'est pas judicieux d'introduire un tel modèle dans le simulateur Batimac. Les méthodes de réduction modale constituent une excellente alternative permettant de concilier *rapidité* et *précision* pour la modélisation de ce type de composant.

Le plancher chauffant et l'enveloppe du bâtiment sont traités comme un ensemble. L'enveloppe est modélisée classiquement en une dimension alors que le plancher est bidimensionnel. La température du plancher et celle dans l'enveloppe sont décomposées sur une base modale de Fourier. Le couplage entre l'enveloppe et le plancher s'effectue par la température de l'air intérieur. Dans [2], nous avons montré qu'il est possible de réduire la dimension du problème à seulement 16 inconnues (4 pour le bâtiment, 10 pour le plancher, 1 pour l'air et une pour le fluide caloporteur) pour modéliser finement la dynamique temporelle de l'ensemble tout en respectant les détails de la géométrie. L'écart maximum de température entre le modèle réduit et le modèle détaillé est de 0.2°C sur la température de l'air intérieur du bâtiment. Par ailleurs, les propriétés d'orthogonalité des modes ont permis de découpler la résolution du système. Seules deux multiplications vectorielles sont nécessaires à la résolution du problème à chaque pas de temps

Pour le composant (b), où le phénomène physique est considéré instationnaire, non linéaire et aux conditions limites non homogènes, la méthode modale de Branche suivi d'une réduction par amalgame modal se montre très efficace [5]. A titre d'exemple, pour une petite unité de stockage dont le modèle complet nécessite 1071 nœuds [6], 23 modes de Branche seulement suffisent pour simuler le même problème avec un écart maximal de 0.3°C sur la température.

4. Le simulateur Batimac et ses fonctionnalités

4.1. Développement du simulateur Batimac

Les divers composants interagissant les uns avec les autres, l'étape suivante consiste à élaborer la stratégie de fonctionnement du système. Pour ce type de système multi-énergies et multi-objectifs constamment perturbé par les conditions climatiques et les utilisateurs, le contrôle prédictif semble être la stratégie de commande la plus efficace pour satisfaire aux exigences des occupants tout en minimisant la consommation d'énergie du système [7]. Mais pour l'instant, ce type de commande n'est pas envisageable dans le simulateur Batimac à

cause de la complexité du système et du temps de simulation supplémentaire que requiert une telle approche. Par ailleurs, sachant que dans le bâtiment, un système de cogénération peut servir à satisfaire [8]:

- aux besoins thermiques et électriques, ou
- aux besoins thermiques et à une partie des besoins électriques, ou
- aux besoins électriques et à une partie des besoins thermiques, ou
- à une partie des besoins thermiques et à une partie des besoins électriques.

Nous avons adopté une approche plus classique qui consiste à prédéfinir des stratégies de fonctionnement selon chacune des tâches ci-dessus. Ainsi, une stratégie de fonctionnement donnée permet de faire fonctionner ou non un composant ou bien d'ouvrir ou fermer les organes de contrôle (i, j et k).

4.2. Fonctionnalités du simulateur Batimac

Le simulateur Batimac doit être capable de simuler toutes configurations du système Batimac couplé à un bâtiment quelconque, afin de proposer un système adapté aux besoins du client tout en consommant le moins d'énergie possible. Le simulateur doit être alors absolument paramétrable, si l'on veut permettre à l'utilisateur de faire les études paramétriques nécessaires au dimensionnement du système. En plus de cette flexibilité, le simulateur offre la possibilité à l'utilisateur de simuler tout type de condition climatique et de scénarios d'occupation et ou de consommation. Quant aux résultats de simulation, ils sont sauvegardés de façon synthétique dans un dossier portant le nom du projet.

5. Etude de performances du système Batimac à travers le simulateur

Pour cette analyse, on considère une configuration du système Batimac où les composants (a), (b) et (f) n'existent pas. Aussi, la consommation électrique du système (pompes, vannes, ...) n'est pas prise en compte. Le but du système consiste à couvrir les besoins thermiques (chauffage et ECS). La puissance nominale du GAC (c) est de 50 kW et le stockage (e) est dimensionné pour stocker environ 50 kwh de chaleur utile. La charge est un bâtiment de 1080 m² bâti sur 3 niveaux dont la résistance thermique des parois est de 3.2 m².K/w. Pour le confort des 34 (adulte équivalent) occupants, la température est réglée à 19°C pendant la période de chauffage et le taux de renouvellement d'air fixé à 0.5 vol/h. La zone climatique simulée est celle de Trappe (zone H1a) et les scénarios d'occupation et de puisage d'ECS sont issus de [9]. Les besoins électriques sont tirés de « European Electrical Standard Profiles » de l'annexe 42 IEA/ECBCS.

5.1. Economies d'énergie primaire par rapport à un système classique

C'est l'un des principaux critères pour mesurer la performance d'un système de cogénération ; il est défini par l'équation (1). Le passage de l'énergie finale vers l'énergie primaire s'obtient en considérant pour le système classique un rendement de 35% et 90% respectivement pour la production d'électricité et de chaleur [8]. Particulièrement en France, ce rendement est justifié puisque le rendement des centrales nucléaires qui produisent près de 75% de notre électricité est en moyenne de 33%.

$$\eta_{EP} = \left| \frac{\text{Energie Primaire totale (Syst.Classique - Syst.Cogé.)}}{\text{Energie Primaire totale Syst.Classique}} \right| \quad (1)$$

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats d'une simulation annuelle, ayant nécessité seulement une durée de 11 minutes. Après calcul, il en ressort que l'utilisation du système

Batimac permet d'économiser 35% d'énergie primaire par rapport au système classique de production d'énergie défini ci-dessus.

	Système Batimac	Système classique
Electricité fournie	5.76×10^4	16.44×10^4
Chaleur utile fournie	7.57×10^4	8.41×10^4
Consommation totale du système	16.22×10^4	24.86×10^4

Tableau 1: Energie primaire en kWh

5.2. Calcul du rendement global du système Batimac

Pour comparer les systèmes de cogénération entre eux, deux critères reviennent très souvent; le rendement électrique η_{el} et le rendement thermique η_{th} dont la somme permet d'obtenir le rendement global du système η_g . Ces rendements sont définis par:

$$\eta_{el(th)} = \frac{\text{Energie Elec. (ou Thermique) Produite}}{\text{Energie Consommée par le système}} \quad (2)$$

L'application de (2) dans le cadre de la simulation précédente (Tableau 1) permet de trouver : $\eta_{th} = 46.6\%$, $\eta_{el} = 35.4\%$, et par conséquent $\eta_g = 82\%$. Ce rendement global fait du système Batimac un système très performant, d'autant plus que le rendement global des systèmes de micro-cogénération de grande puissance est autour de 75% **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

5.3. Etude de l'efficacité globale du système Batimac

Le rendement global calculé ci-dessus découle directement du premier principe de la thermodynamique, et ne met donc pas en évidence la qualité de la production d'électricité et de chaleur. C'est pourquoi très souvent en parallèle de cette étude énergétique l'on associe une analyse exergetique. A défaut de faire ce type d'analyse ici, nous proposons une étude de l'efficacité du système. Cette analyse diffère de l'analyse classique des systèmes de cogénération car elle s'appuie sur un bilan d'énergie allant bien au-delà du convertisseur, jusqu'à la charge du système. Rappelons par ailleurs que ce type d'analyse est très corrélé à la stratégie de fonctionnement du système que l'on choisit. Notons que sur une période donnée, l'efficacité est le rapport entre l'énergie utile fournie à la charge et l'énergie consommée par le système. Nous représentons sur la Figure 2 l'efficacité du système Batimac pour différentes périodes de l'année.

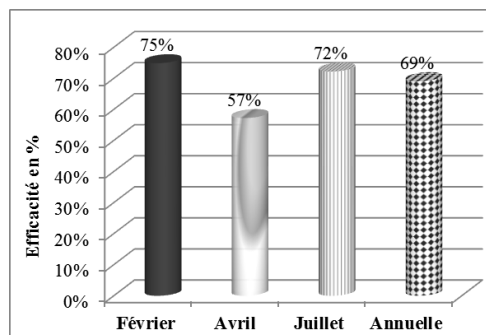


Figure 2: Efficacité du système Batimac

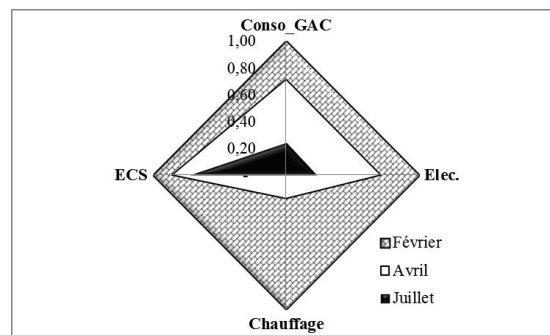


Figure 3: Radar de consommation relative

On constate que l'efficacité annuelle (69%) est bien plus faible que le rendement global, car ici, toutes les pertes sont comptabilisées dans le bilan d'énergie. On note par ailleurs une disparité de ce critère par rapport aux différentes saisons de l'année. Si le système est capable

de transformer jusqu'à 75% de l'énergie reçue en énergie utile en plein hiver et 72% en été, c'est ne pas le cas en mi-saison (à l'instar du mois d'avril). Cette baisse de performance est principalement due à la stratégie de fonctionnement mis en œuvre. La Figure 3 montre qu'en avril, l'essentiel des besoins thermiques se limite à la production d'ECS. Mais pendant cette période, puisqu'il peut avoir des besoins en chauffage, le système s'assure de pouvoir y répondre en allongeant son temps de fonctionnement pour produire une énergie qui sera finalement peu utilisée, car les besoins en chauffage sont relativement faibles en mi-saison.

Dans cette analyse, il est important de souligner la capacité du système à s'adapter à la demande en hiver comme en été. Comme on pouvait s'y attendre, cette configuration du système Batimac va être plus performante en hiver, le chauffage basse température permettant de rejeter peu d'énergie via l'aéroréfrigérant.

5.4. Le système Batimac et la satisfaction des occupants

Selon la stratégie de fonctionnement choisie, Batimac doit être capable de satisfaire aux besoins de l'utilisateur. Nous analysons ici la capacité du système à satisfaire aux trois critères (relatif au chauffage, à l'ECS et à la consommation électrique) définis ci-dessous :

- ✓ C1 : Température d'air intérieur $\geq 19^{\circ}\text{C}$ sur la période de chauffe (du 01/01 au 20/04 et du 01/10 au 31/12) et pendant l'occupation du bâtiment,
- ✓ C2 : Fournir de l'ECS au moins à 40°C , en respectant la réglementation,
- ✓ C3 : Consommation électrique inférieure à la production sur toute l'année.

La Figure 4 montre que le critère relatif au confort thermique des occupants est satisfait à 91%. De plus, lorsque C1 n'est pas satisfait, l'écart moyen de température par rapport à la consigne est autour de 0.2°C (soit environ la précision d'un thermocouple).

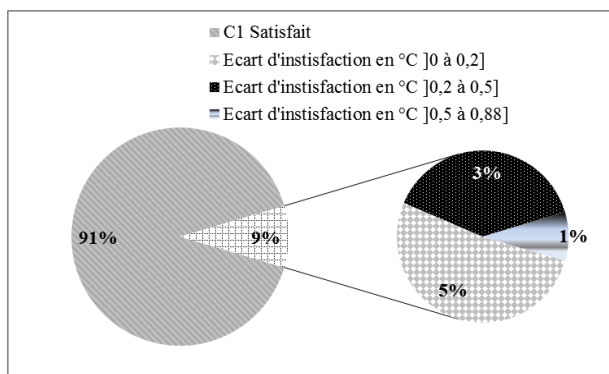


Figure 4: Résultats de l'analyse du critère C1

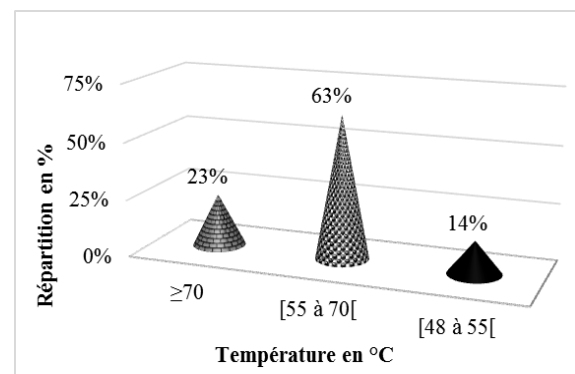


Figure 5: Température de sortie de l'ECS

En outre, le rapport entre la quantité d'énergie électrique produite et celle consommée sur une année s'élève à 1.26 ; d'où un excédent de production d'électricité pouvant être revendu. Enfin, pour le critère 2, l'analyse des résultats de simulation montre que la température de l'eau mitigée lors des puisages était toujours à 40°C . Rappelons que la réglementation sur l'ECS impose entre autres mesures, en permanence une température en sortie du poste d'ECS $\geq 55^{\circ}\text{C}$ ou de porter le ballon d'ECS à 70°C pendant 2 minutes par période de 24 h. La répartition de la température du ballon haut du poste ECS donnée à la Figure 5 met évidence la capacité du système à satisfaire au critère portant sur la production d'eau chaude sanitaire.

6. Conclusion

Nous avons expliqué le principe de fonctionnement du système de micro-tri-génération Batimac à travers un schéma synoptique. Cette première partie a permis de souligner la complexité du système et par conséquent la nécessité du simulateur numérique que nous

avons élaboré. L'étude des performances d'une configuration du système Batimac associée à un bâtiment de logement collectif à travers ce simulateur, montre qu'avec un rendement global de 82%, ce système permet d'économiser jusqu'à 35% d'énergie primaire par rapport à un système classique. Sachant que cette économie d'énergie se traduit aussi en une économie de rejet de gaz à effet de serre, il apparaît que Batimac est une solution performante en terme de maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment.

L'étude d'efficacité du système a montré que sur une année complète 69% de l'énergie primaire ont été transformés en énergie utile pour le bâtiment. Particulièrement en hiver, l'efficacité du système atteint 75% et seulement 57% au mois d'avril. Ce résultat attire notre attention sur la difficulté du contrôle de ce type de système et confirme l'utilité d'une stratégie de commande plus sophistiquée si l'on veut conserver de bonnes performances en mi-saison. En outre, à la question de savoir si ce système Batimac est capable de satisfaire aux exigences des occupants du bâtiment, l'analyse des critères C1, C2 et C3, nous permet de répondre par l'affirmative.

Ces conclusions montrent qu'un simulateur est incontournable pour le dimensionnement et l'analyse des performances d'un tel système. De plus l'introduction de modèles réduits permet de modéliser finement des composants fortement maillés, tout en gardant un temps de calcul relativement court (la durée moyenne d'une simulation annuelle est de 15 minutes). Cela ouvre la voie à une étude paramétrique poussée en vue de proposer un système sur mesure.

Références

- [1] S. Brou, F. Joly, K. Gokpi, A. Neveu & V. Artigue, Modélisation et simulation d'un système énergétique pour bâtiment autonome en énergie, *Conférence IBPSA France-Arras* (2014).
- [2] B. Gaume, S. Brou, F. Joly & A. Neveu, Réduction modale d'un plancher chauffant. *Congrès SFT France-Lyon* (2014).
- [3] J. Castiaing-Lasvignottes, Aspects thermodynamiques et technico-économique des systèmes à absorption liquide, *Institut Français du froid industriel*, (2001).
- [4] D. Blandin, Modélisation et validation expérimentale de nouveaux concepts de ballons solaires à forte stratification, *Thèse de Doctorat*, (2010).
- [5] O. Quemener, A. Neveu & E. Videcoq, A specific reduction method for the branch modal formulation: Application to a highly non-linear configuration, *IJTS*, 46(2007) 890-907.
- [6] M. Lacroix, Numerical simulation of shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit, *Solar Energy*, 50(1993), 357-367.
- [7] J. Eynard, Gestion optimale de l'énergie dans un procédé multi-source pour le chauffage de bâtiments, *Thèse de Doctorat*, (2010).
- [8] I. Knight et al., Residential Cogeneration Systems: A Review of The Current Technologies. A Report of Subtask A of FC+COGEN-SIM. The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems, Annex 42 of the IEA/ECBCS, (2005) 92 pages.
- [9] CSTB, *Méthode de calcul Th-BCE 2012*, 1377 pages.
- [10] H.I. Onovwiona & V.I. Ugursal, Residential cogeneration systems: review of the current technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(2006) 389-431.
- [11] B. Newton. Modeling of solar storage tanks. PhD thesis, *Université de Wisconsin Madison*, 1995.