

Réalisation d'un modèle de bâtiment intégrant les systèmes de récupération, de stockage et de génération de l'énergie pour un dimensionnement rapide et optimal.

Solène BEAUCHENE^{1,2*}, David BLANDIN¹, Bruno LADEVIE², Bernard BAUDOIN³

¹CARDONNEL Ingénierie, 5 rue de la mare à Tissier – 91280 Saint Pierre du Perray

²Laboratoire RAPSODEE (UMR5302)

Ecole Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmaux – 81013 Albi CT Cedex 09

³Laboratoire du département Energétique Industrielle

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai – 59508 Douai Cedex

*(auteur correspondant : solene.beauchene@cardonnel.fr)

Résumé - La finalité de ce projet est de réaliser un outil capable de proposer un choix, un ordonnancement et un dimensionnement optimal de l'ensemble des systèmes de récupération, de stockage et de génération de l'énergie d'un bâtiment. Cet article décrit le modèle réalisé pour répondre à ce besoin. Ce modèle s'articule autour de quatre modules (enveloppe, récupération, stockage et génération) traversés par des flux d'énergie et de matière. Chaque module est caractérisé par un nombre restreint de paramètres afin de représenter le comportement d'un maximum de systèmes réels.

Nomenclature

K	Coefficient d'échange (W/m ² .K)	m	Débit (kg/s)
S	Surface d'échange (m ²)	E	Efficacité (-)
UA	Coefficient d'échange (W/K)		
Cp	Capacité calorifique (J/kg.K)		<i>Indices et exposants</i>
ρ	Masse volumique (kg/m ³)	s	Stockage
V	Volume (m ³)	env	Environnant
P	Puissance (W)	ech	Echangeur
T	Température (°C)	recup	Flux de récupération

1. Introduction

Le secteur du bâtiment est très énergivore puisqu'il représente à lui seul 42% de l'énergie consommée en France. Il est impacté par des mesures gouvernementales qui prévoient de réduire les consommations en énergie à l'horizon 2020, mais également d'intégrer des exigences en émission de CO₂.

Pour répondre à ces besoins d'économie en énergie et en émission de CO₂, le projet Smart Thermogène Grid® a été initié. Ce dernier s'intéresse à l'intégration de solutions de récupération et de stockage des énergies fatales et renouvelables dans le bâtiment résidentiel. Le caractère novateur de ce projet soulève quatre problèmes majeurs pour les concepteurs : le choix des systèmes permettant à la fois la récupération, le stockage et la génération de l'énergie ainsi que leur ordonnancement, leur dimensionnement et enfin leur pilotage.

Actuellement, pour répondre à ce type de problèmes, il est nécessaire d'avoir recours aux simulations thermiques dynamiques (STD). Cependant, elles sont chronophages et ne sont pas adaptées à une démarche de choix et d'optimisation globale des systèmes. L'objectif est donc de proposer un outil innovant qui offre un compromis entre ce type d'approche et des méthodes simplifiées non globales.

Cet article présente la démarche générale adoptée pour la construction de cet outil. Il détaille principalement la structure du modèle ainsi que l'ensemble des éléments qui le constituent.

2. Contexte de l'étude

Le schéma présenté ci-dessous permet d'appréhender quelques problématiques rencontrées lors de la phase d'intégration des équipements de récupération et de stockage.

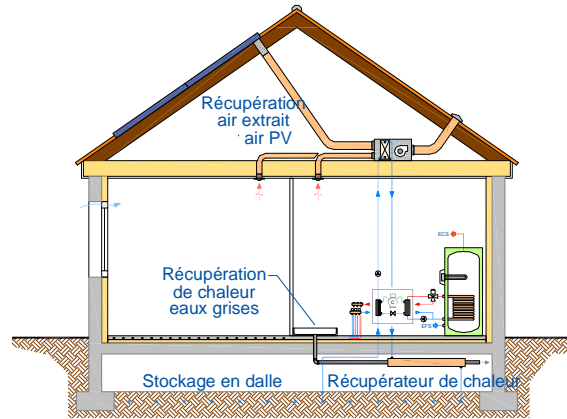


Figure 1 : Maison intégrant des systèmes de récupération et de stockage

Capte-t-on assez d'énergie pour un bon fonctionnement de la pompe à chaleur (PAC) ? Est-il nécessaire d'installer l'ensemble des systèmes de récupération ? Comment agencer les systèmes pour optimiser la récupération ? Comment intégrer et gérer les bypass ? ...

Pour répondre à ces problématiques, l'outil réalisé propose un choix, un ordonnancement et un dimensionnement de l'ensemble des systèmes et des flux pour un bâtiment donné.

3. Démarche de résolution et présentation du modèle

3.1. Démarche de résolution

Un modèle de type « boîte grise » qui décrit le bâtiment et les différents systèmes qui le composent est réalisé. Cette abstraction du système réel permet la recherche et le dimensionnement de solutions satisfaisantes au regard d'un modèle d'évaluation multicritère [1]. La figure 2 illustre la démarche mise en place qui peut être segmentée en 2 étapes. La modélisation du problème qui est détaillée dans la suite de l'article et la démarche d'optimisation qui n'a pas encore été développée. Tout d'abord, le problème est initialisé et les objectifs sont fixés (performances énergétiques, coût...). Puis, le dimensionnement est validé ou non au regard des critères d'évaluation. Si le résultat obtenu n'est pas satisfaisant une nouvelle itération est réalisée.

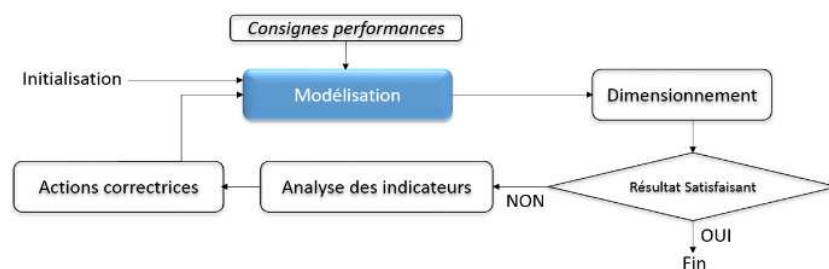


Figure 2 : Concept du fonctionnement de l'outil final

3.2. Présentation du modèle

3.2.1. Structure du modèle

Le modèle étudie au pas de temps horaire la manière dont les flux de matière et d'énergie transitent entre les différents systèmes considérés. La démarche proposée s'inspire des techniques de modélisation issues du génie des procédés [2]. Des outils modélisant les échanges de puissance entre les systèmes du bâtiment exploitent également ce type de démarche [3].

La démarche consiste à décomposer le modèle selon quatre systèmes d'opération unitaire pertinents appelés « modules » : l'enveloppe, la récupération, le stockage et la génération. Il est ainsi possible de résoudre des bilans pour l'ensemble des modules, de calculer les caractéristiques des flux qui circulent et de fournir les éléments nécessaires au dimensionnement. Chaque flux est caractérisé par un débit et une température ou une puissance. Quatre types de flux pertinents ont été identifiés : les flux de chauffage, d'eau chaude sanitaire (ECS), de récupération et d'alimentation. L'évolution des flux dans les différents modules n'est pas imposée. Ainsi, il est possible de travailler sur l'ordonnement des flux, qui représente un des objectifs majeurs de l'outil.

Enfin, chaque module est caractérisé par un nombre restreint de paramètres permettant ainsi de décrire le comportement d'un grand nombre de systèmes réels. La granularité de modélisation de ces paramètres doit être suffisamment générique pour représenter le maximum de systèmes réels tout en étant assez précise pour décrire leur comportement de façon pertinente (Figure 3). Ainsi, en réduisant le nombre de paramètres à faire varier il est possible d'atteindre les 2 derniers objectifs fixés que sont le choix et le dimensionnement des systèmes.

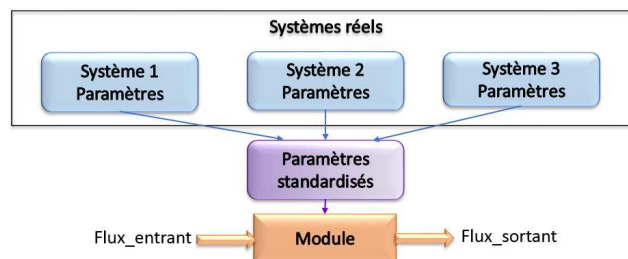


Figure 3 : Paramétrage généralisé des systèmes

3.2.2. Les modules

- Données d'entrées

Les données d'entrée peuvent être considérées comme des conditions aux limites. Elles ne sont pas affectées par les différentes entrées/sorties des modules. Actuellement, elles sont fixées au pas de temps horaire.

- Données climatique (Données RT2012).
- Profil ECS (Méthode probabiliste [4]). Les données d'entrée sont le volume total d'eau chaude puisée à 40°C et le nombre de foyers. Un profil de puisage foisonné est obtenu.
- Profil des besoins de chauffage (Réglementation thermique 2012 [5]). Par la suite, une méthode de calcul de type polynomiale basée sur moins de paramètres comme celle proposée par Catalina [6] sera intégrée.

Ces données d'entrée sont indispensables au fonctionnement du modèle. Cependant, elles peuvent évoluer : utilisation de nouvelles données climatiques, estimation suivant d'autres méthodes des besoins d'ECS (RT, AICVF...) et des besoins de chauffage (STD).

- L'enveloppe

Ce module permet de connaître les températures d'air, d'ECS, d'eaux usées et de retour chauffage. La Figure 4 illustre les flux d'entrée et de sortie ainsi que les paramètres pouvant intervenir dans ce module.

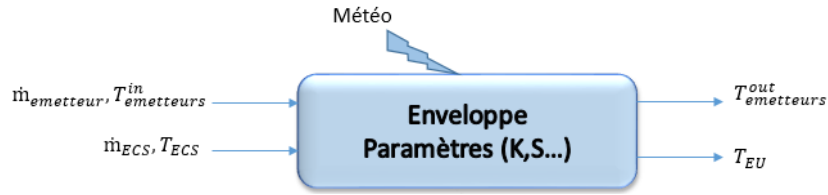


Figure 4 : Module de l'enveloppe

Le principal calcul permet d'évaluer la température en sortie des émetteurs. Ils sont modélisés comme des échangeurs. Un calcul du NUT est réalisé à partir des coefficients d'échanges de rayonnement et de convection qui dépendent de la température d'entrée et de la température ambiante. Pour la température en sortie des eaux usées (EU), une chute de 5K est considérée.

- La récupération

Les grands types de récupération pris en charge par le module sont : la récupération sur les eaux usées (EU), la récupération sur l'air (air extrait, air extérieur, air sous panneaux solaires...), la récupération solaire thermique et la récupération géothermique. Dans ce module, le travail porte principalement sur la gestion et l'ordonnancement des flux. Pour l'ensemble des systèmes à modéliser, grâce aux paramètres standardisés, un unique calcul permet de déterminer les données de sorties. Il dépend des flux entrant et du coefficient d'efficacité (E) qui est évalué par la méthode du NUT.

$$T_{out} = T_{in} + E(t) * \frac{P_{récup}}{\dot{m}Cp} \quad (1)$$

- Le stockage

Le module stockage prend en considération à la fois les stockages thermiques et les stockages électriques. Le travail se focalise sur le choix du type de stockage et sur son dimensionnement. Le modèle actuel pour l'ensemble des stockages thermiques considère une température uniforme de stockage (modèle idéalement brassé), le calcul est détaillé ci-dessous. Il prend en charge les stockages par chaleur sensible (en cuve, en dalle, dans le sol...) ou par chaleur latente (matériaux à changement de phase).

$$\rho V C_p(T_s) \frac{dT_s}{dt} = \dot{m}_s^{in} * T_s^{in} - \dot{m}_s^{out} * T_s + U A_s * (T_{env} - T_s) + \sum U A_{ech} * \Delta T_{ech} \quad (2)$$

- La génération

Le module génération considère l'ensemble des systèmes de génération de type PAC, chaudières, poêles, systèmes de cogénération... Le choix du type de génération est important car il permet l'utilisation et la conversion partielle ou totale de l'énergie récupérée. Les performances du système sont évaluées en fonction des températures et des débits d'entrée des fluides et des températures de consigne. Pour une PAC, une matrice de performance qui dépend de la température de la source froide et de la température de sortie du fluide est utilisée.

L'approche globale de la modélisation par module permet de caractériser aisément un grand nombre de systèmes réels. Dans la section suivante un exemple est proposé afin d'illustrer les travaux présentés. Il permet de mettre en exergue l'intérêt du modèle décrit dans cet article.

4. Exemple

4.1. Présentation de l'étude

L'objectif de cet exemple est d'illustrer une des fonctionnalités de l'outil qui consiste à ordonnancer les différents flux. Dans cet exemple, les systèmes sont imposés ainsi que leur dimensionnement. Ainsi, les modules permettent de modéliser les systèmes suivant : une PAC, un ballon de stockage et des échangeurs pour la récupération.

Les sept flux qui évoluent dans ces modules sont décrits dans le tableau ci-dessous.

Flux	Fluide	Fonction	Débits (m ³ /h)
Alimentation	Eau glycolée	Source froide PAC (SF)	0.5
	Eau	Echangeur ballon	1
Chauffage	Eau	Radiateurs	0.27
ECS	Eau	Eau	Profil puisage
Récupération	Air	Chaleur sous panneaux solaires (A.PV)	400
	Air	Air extrait (AE)	167
	Eau	Eaux usées (EU)	Profil puisage

Tableau 1 : Caractéristiques des flux

L'évolution des flux est fixée dans les modules de génération, de stockage et dans l'enveloppe. Le travail porte uniquement sur l'évolution de la source froide de la PAC dans le module de récupération comme l'illustre la figure 5 ci-dessous. La figure 1, présentée au début de l'article, privée du stockage en dalle représente la combinaison avec récupération sur l'air issu des panneaux photovoltaïques et de la VMC puis sur les eaux usées.

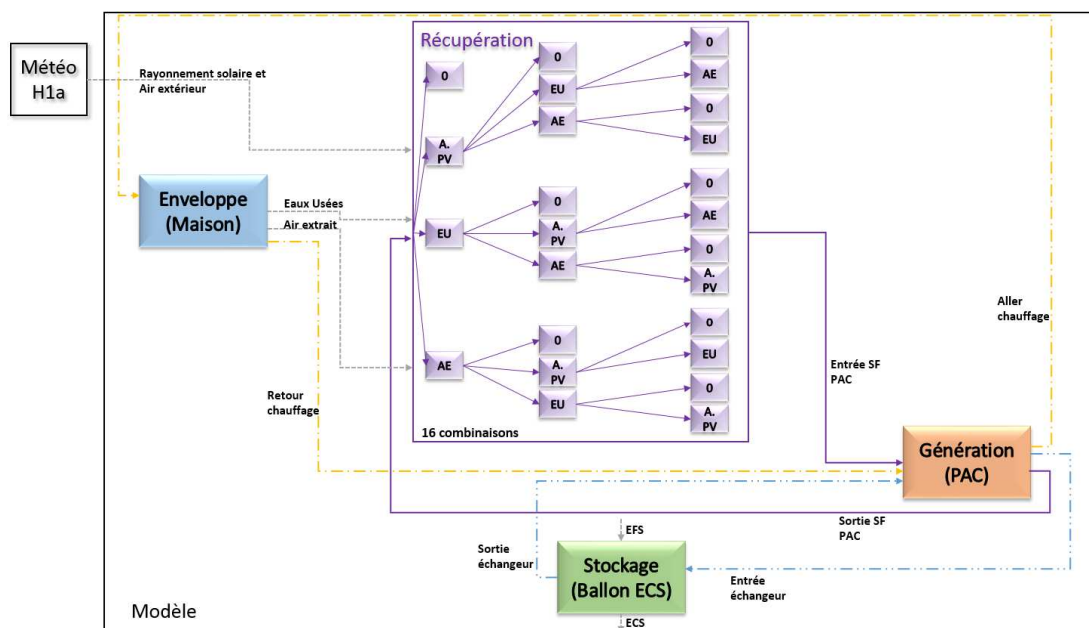


Figure 5 : Configurations de l'exemple

Ainsi, l'objectif est de déterminer la combinaison qui permet d'obtenir la plus petite consommation en énergie fossile parmi les 16 configurations impliquées.

Les figures suivantes présentent le pilotage adopté pour l'ensemble des simulations. L'appoint est idéal, les températures de consigne pour le chauffage (Figure 6) et pour l'ECS sont toujours atteintes. Pour la récupération (Figure 7), des bypass sont mis en place afin que la source froide capte uniquement de l'énergie, si sa température devient supérieure au flux de récupération alors elle est bipassée.

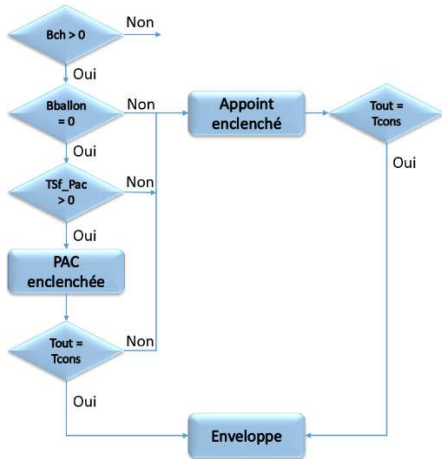


Figure 6 : Pilotage pour le chauffage

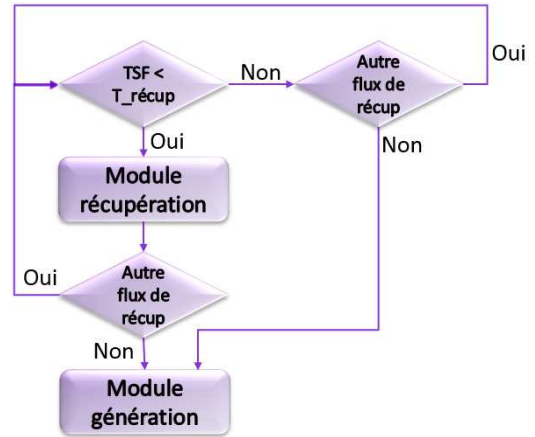


Figure 7 : Pilotage pour la récupération

L'étude porte sur une maison individuelle de 90 m²SHAB, située en zone H1a (Paris). Ses besoins en chauffage sont de 31.8kWh/m²SHONrt.an et ses besoins en ECS sont de 17kWh/m²SHONrt.an. Les différentes caractéristiques des modules sont décrites ci-dessous.

- La récupération :

Les trois types de récupération modélisés sont caractérisés par les coefficients d'efficacité nominaux présentés dans le Tableau 2.

	<i>Symbole</i>	<i>Efficacité</i>
Récupération air chaud sous panneaux	A.PV	0.3
Récupération air extrait	AE	0.6
Récupération eaux usées	EU	1

Tableau 2 : *Efficacité des échangeurs*

La source froide de la PAC est utilisée comme une boucle de récupération. Elle va venir capter l'énergie sur les différentes sources (A.PV, AE, EU).

- La génération

Une PAC électrique eau/eau se charge de la génération de chauffage et d'ECS, la priorité est donnée à l'ECS. L'objectif est d'atteindre sur chaque pas de temps les différentes températures de consigne : loi d'eau pour le chauffage et température d'entrée fixée à 55°C pour l'échangeur.

	<i>COP</i>	<i>P_calorifique (kW)</i>
10/7°C 40/45°C	4.02	7
0/-3°C 40/45°C	3	5.1

Tableau 3 : *Performances PAC*

- Le stockage

On considère un ballon de stockage d'ECS d'un volume de 300L maintenu à une température de 50°C par la PAC pour répondre aux besoins d'eau chaude sanitaire.

4.2. Résultats

La méthode d'optimisation n'étant pas encore développée l'ensemble de la combinatoire a été parcourue. Le modèle permet d'obtenir les consommations pour les 16 combinaisons.

Les solutions qui combinent la récupération sur l'air des panneaux puis de façon indifférente la récupération sur l'air extrait et sur les eaux usées (APV-AE-EU ou APV-EU-AE) sont les plus performantes d'un point de vue énergétique (Figure 8). Elles permettent de diviser par 2 la

consommation en énergie fossile par rapport à la solution de référence sans récupération (chaudière gaz, rendement 98%). Pour ces solutions, le gain en énergie primaire est évalué à 5kWh/m².an par rapport à la solution de référence. Il est important de noter que la combinaison avec la récupération sur les eaux usées et sur l'air extrait offre de bonnes performances, elle sera certainement plus avantageuse financièrement qu'une solution impliquant 3 systèmes de récupération. Il est donc nécessaire d'intégrer l'aspect financier dans la démarche d'optimisation.

Néanmoins, cette figure met en avant une mauvaise utilisation de l'énergie récupérée. La source froide de la PAC n'utilise en moyenne que 60% de l'énergie récupérée disponible. Cela est notamment dû à l'offre en énergie récupérée qui ne correspond pas toujours aux besoins.

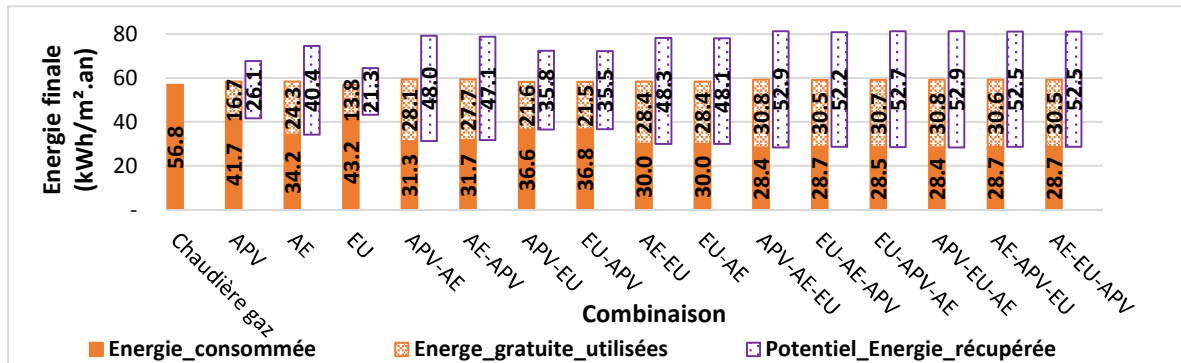


Figure 8 : Evolution de la consommation et de la récupération en énergie

Le gisement d'énergie récupérable sur l'air extrait est important (Figure 9). L'énergie captée sur l'air à 19°C environ est de 12kWh/m² sur une journée contre 4kWh/m² sur les eaux usées à 35°C. En effet, il s'agit d'une ressources continuellement disponible et donc plus facilement valorisable.

La boucle de récupération sur la source froide de la PAC présente un réel intérêt (Figure 9). En effet, la source froide doit circuler quand il n'y a pas de besoins, afin de venir capter l'énergie des différentes sources de récupération et ainsi se maintenir en température. Les performances de la PAC sont donc améliorées (COP moyen de 3.2 pour la solution avec récupération sur l'air extrait uniquement et de 3.4 pour les solutions avec 3 systèmes de récupération). Cependant, en intersaison la source froide monte en température durant la journée car l'énergie disponible est importante et les puisages d'ECS sont rares. Par conséquent, sa température devient supérieure aux flux de récupération et les systèmes sont bypassés. Il faudra donc prévoir un stockage tempéré afin de maximiser la récupération et ainsi la rendre optimale. Il faut également rester vigilant sur les consommations des auxiliaires liés à ces nouveaux systèmes.

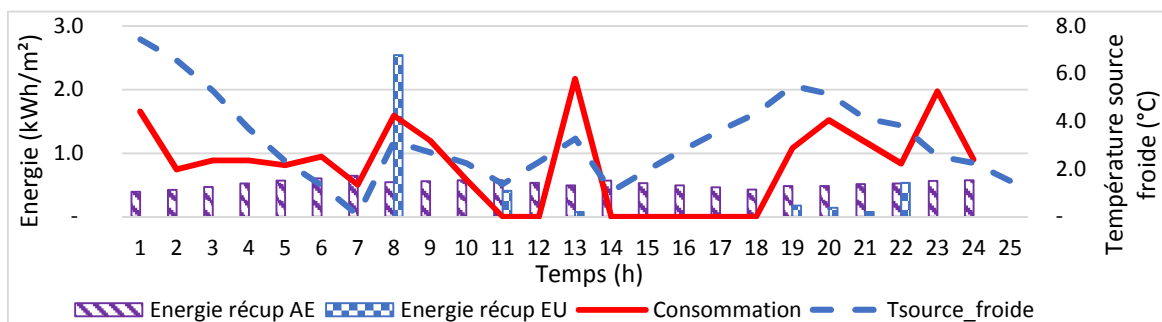


Figure 9 : Evolution sur une journée de la récupération et des consommations

L'approche globale proposée sur la configuration des flux permet d'appréhender l'impact des différentes combinaisons et de proposer des pistes d'amélioration au niveau des systèmes à

intégrer (tel que le stockage) mais également au niveau du pilotage (fonctionnement des systèmes, températures de consignes...).

L'intégration de systèmes de récupération et de stockage offre donc de nouvelles perspectives intéressantes en termes d'économie en énergie et en émission de CO₂ qui viendront compléter les travaux habituellement menés sur les niveaux d'isolation de l'enveloppe. Il sera alors possible d'aller vers des bâtiments encore plus performants.

Une seule des composantes de l'outil est développée dans cet exemple, celle de l'ordonnancement des systèmes par la suite l'optimisation de leur dimensionnement sera intégrée.

5. Conclusion

Dans un contexte réglementaire qui promeut l'utilisation de nouveaux systèmes de récupération et de stockage de l'énergie dans le bâtiment, les concepteurs ont besoin d'une méthode d'intégration globale de ces systèmes. En effet, les outils traditionnels sont peu adaptés et chronophages.

Pour répondre à cette problématique un outil est en cours de développement. Il s'appuie sur le modèle présenté dans cet article qui est construit suivant les approches de modélisation du génie des procédés. En effet, ce modèle étudie la manière dont les flux d'énergie et de matière transitent entre différents modules (enveloppe, récupération, stockage, génération) caractérisés par un nombre restreint de paramètres.

Les travaux en cours de réalisation confrontent le modèle présenté à des modélisations TRNSYS [7]. L'objectif est de valider et de confirmer la pertinence de ce dernier. Il sera alors possible de proposer une méthode d'optimisation multicritère rapide et efficace qui intégrera les aspects énergétiques et financiers afin de choisir et de paramétrer les systèmes et les flux.

Références

- [1] T. Catalina, J. Virgone, E. Blanco, *Multi-source energy systems analysis using a multi-criteria decision aid methodology*, Renewable Energy, vol. 36 (2011).
- [2] X. Joulia, *Simulateur de procédés*, Dossier Technique de l'Ingénieur (2008).
- [3] E. Fabrizio, *Modélisation des systèmes multi énergies dans le bâtiment*, Thèse de doctorat en énergétique et génie civile, INSA de Lyon (2008).
- [4] U. Jordan, K. Vajen, *DHWcalc, Program to generate domestic hot water profiles with statistical means for user defined conditions*, Proc. ISES Solar World Congress, Orlando (2005).
- [5] *Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performances énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments*, Journal officiel de la République Française, Texte 7 sur 176 (2010).
- [6] T. Catalina, J. Virgone, E. Blanco, *Développement d'un outil pour l'optimisation des besoins d'une habitation et le choix des systèmes à énergie renouvelable*, Congrès IBPSA, Lyon (2008).
- [7] *TRNSYS version 17 : Transient System Simulation Tool*, University of Wisconsin-Madison.

Remerciements

Ces travaux sont supportés par CARDONNEL Ingénierie et par l'Association Nationale de la Recherche et la Technologie (ANRT) sous le numéro de dossier 1092/2012.