HAL
open science

Modélisation énergétique d'un parc de chauffe-eau électriques : éléments de validation

Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Philippe Riviere

To cite this version:

Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Philippe Riviere. Modélisation énergétique d'un parc de chauffe-eau électriques : éléments de validation. Conférence IBPSA France 2016, May 2016, Champs-sur-Marne, France. hal-01478676

HAL Id: hal-01478676

https://hal.science/hal-01478676v1

Submitted on 28 Feb 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation énergétique d'un parc de chauffe-eau électriques : éléments de validation

Thomas Berthou*[1], Bruno Duplessis[1], Philippe Rivière[1]

[1]MINES ParisTech, PSL Research University, Centre d'efficacité énergétique des systèmes
60 bd St Michel, 75006 Paris
*** thomas.berthou@mines-paristech.fr**

RESUME. Un modèle bottom-up de parc de chauffe-eau électrique est construit sur la base d'enquêtes nationales et d'un modèle physique d'accumulation simplifié. Un parc réduit, représentatif de l'ensemble des logements français est utilisé pour limiter le coût de calcul. Les paramètres non connus (débit de puisage d'eau chaude, probabilité de mise en route) sont calibrés afin de minimiser l'erreur sur la prévision de la courbe de charge nationale et sur la consommation annuelle d'électricité liée à l'ECS. Le parc calibré permettrait de tester des stratégies de maîtrise de la demande en électricité à différentes échelles.

MOTS-CLÉS : courbes de charge agrégées, chauffe-eau électriques résidentiels, modélisation bottom-up

ABSTRACT. A bottom-up model of electric water heater stock is built from national census and with simplified water tank model. A reduced stock is used to represent French national dwelling and to have reasonable CPU cost. Unknown parameters (hot water flow rate, start probability) are identified to have the best national load curve prediction and annual electricity consumption link to DHW. The identified stock should be able to design demand-response strategies at several scales.

KEYWORDS: aggregated load curves, residential electric water heater, bottom-up modeling

1. INTRODUCTION

Historiquement, les chauffe-eau électriques peuvent être pilotés à distance par le gestionnaire du réseau pour décaler les consommations la nuit ou en milieu de journée, lorsque la demande en électricité est faible. Cela permet, d'une part de limiter l'utilisation de centrales thermiques souvent chères et polluantes lors de pics journaliers, d'autre part de disposer d'une demande minimum en période de faible consommation et d'absorber ainsi la production des centrales nucléaires peu modulables. Actuellement, les heures de mises en route des chauffe-eau sont choisies par le gestionnaire du réseau de distribution pour chaque nouveau contrat et ne sont pas modifiées d'un jour à l'autre. L'intégration à grande échelle des énergies renouvelables (EnR) météo-dépendantes avec des disparités territoriales fortes suscite un changement de paradigme de gestion des systèmes électriques. En effet, il sera bientôt nécessaire d'adapter la consommation électrique de manière dynamique pour

absorber les variations rapides de production afin de garantir son équilibre avec la consommation. Les chauffe-eau électriques semblent adaptés à cet enjeu pour plusieurs raisons :

- ils représentent un poids important dans la consommation nationale : 13% des consommations électriques du secteur résidentiel, (RTE, 2015),
- ils sont répartis sur tout le territoire français et peuvent donc répondre à des contraintes locales,
- ils sont déjà équipés de volumes de stockage adaptés à des stratégies journalières, leur pilotage dynamique ne devrait pas être source d'inconfort,
- leur temps de réactivité est faible et des cycles de marche-arrêt successifs ne devraient pas dégrader leurs performances.

Utiliser les chauffe-eau électriques comme source de flexibilité énergétique nécessite de simuler un échantillon représentatif des chauffe-eau d'un territoire ainsi que leur réaction aux ordres reçus. Pour cela, il faut disposer de modèles réalistes et validés de puisage d'eau chaude et de ballons de stockage. De plus, il faut connaître l'état actuel du parc de chauffe-eau avec notamment la proportion d'appareils pilotables. Dans cet article nous utiliserons Smart-E (Berthou, et al., 2015), une plateforme de simulation énergétique des territoires, pour simuler les consommations instantanées des chauffe-eau électriques à l'échelle de la France. Smart-E permet le paramétrage et la simulation de plusieurs centaines d'équipements énergétiques en un temps raisonnable à l'aide de modèles physiques simples. Les puisages d'eau chaude et les caractéristiques des équipements sont extrapolés à partir d'enquêtes de terrain (INSEE) qui permettent de représenter la diversité des comportements et des équipements à l'échelle nationale. Dans cette étude, le débit moyen de puisage d'eau chaude, la proportion des chauffe-eau commandés et les probabilités de mise en route sur une journée seront calibrés à l'aide d'une approche mixte (bottom-up / top-down). Cette étape de calibration permet la validation de l'approche globale de modélisation à grande échelle. La première partie de cet article présente les différentes étapes qui permettent une modélisation réaliste de la consommation électrique du parc de chauffe-eau. La seconde partie propose une méthode de validation du modèle de parc.

2. MODELISATION DU PARC DE CHAUFFE-EAU ELECTRIQUE

2.1. ETAT DE L'ART

Plusieurs auteurs ont modélisé les chauffe-eau électriques afin de quantifier le potentiel de flexibilité lié à leur pilotage, mais peu d'entre eux ont eu la possibilité de modéliser l'ensemble du parc d'un pays de manière *bottom-up* et de confronter les résultats avec des éléments de validation. Le paragraphe suivant présente un rapide état de l'art des études similaires, en insistant sur l'échelle de modélisation et les cas d'études de pilotage/optimisation des systèmes. Kepplinger (Kepplinger, et al., 2015) propose un algorithme de contrôle optimal autonome pour réduire la pointe de consommation électrique à l'échelle d'un logement. Pour cela, il utilise un modèle 1D stratifié associé à des puisages jugés typiques. Cette approche est particulièrement adaptée à une optimisation grande échelle puisque le seul paramètre exogène est le prix de l'électricité. Moreau (Moreau, 2011) a développé une approche similaire, mais à l'échelle d'une région. Il montre qu'il est possible de réduire la pointe de consommation de 35% en arrêtant les chauffe-eau pendant une à deux heures de manière pseudo aléatoire, mais avec des contraintes de confort. Des mesures de consommation électrique, de température d'eau et de puisage lui permettent de valider son modèle. Atikol (Atikol, 2013) a montré qu'il était possible de remplacer la nécessité d'installer une nouvelle capacité de production d'électricité pour les pointes par le pilotage (délestage) de 6000 chauffe-eau. Ceci grâce à l'utilisation

d'un arbre de décision basé sur l'observation des habitudes de consommation. L'originalité de cette étude par rapport à l'état de l'art est double :

- la modélisation bottom-up et une identification infra-horaire des appels de puissance électrique à l'échelle d'un pays grâce à la sélection d'une population de logements représentatifs,
- la modélisation et l'identification de la méthode de pilotage centralisé des chauffe-eau sur le territoire français.

2.2. CONTEXTE FRANÇAIS

Les logements qui ont souscrit à un tarif heures-pleines/heures-creuses (HPHC) ont leur chauffe-eau électrique mis en route à distance par le gestionnaire de réseau (majoritairement ERDF). Les heures de mise en route sont les mêmes chaque jour de l'année, mais peuvent varier d'un logement à l'autre (même situé dans un même quartier). Elles correspondent à 8h, successives ou non, réparties sur 15 heures, une période de 11h la nuit et une période de 4 heures en milieu de journée. Elles coïncident avec des périodes ou l'électricité est peu chère. Un chauffe-eau peut recevoir 1 à 3 ordres de mise en route par jour en fonction des besoins du gestionnaire du réseau ; ceci étant fixé contractuellement lors de la mise en place de l'abonnement (tableau 1). Il est bien sûr possible pour les occupants d'un logement de forcer la mise en route du chauffe-eau en dehors des HC, ce qui ne sera pas modélisé dans la suite.

	Horaires	durée des HC
Plage 1	02h00-07h00; 14h00-17h00	8h
Plage 2	22h30-06h30	
Plage 3	23h00-07h00	
Plage 4	23h30-07h30	

Tableau 1 : Exemple de plages horaires HPHC à Paris (13ème)

Dans la majorité des cas il y a une seule mise en route du chauffe-eau par jour (ERDF, 2016), pour simplifier le problème on modélisera uniquement cette configuration.

Les abonnements HPHC représentent environ 44% des contrats de fourniture d'électricité, mais correspondent à 69% des consommations énergétiques (CRE, 2013). De plus, 43 % des logements sont équipés de chauffe-eau électriques avec accumulation et 6% sont instantanés (ADEME, 2013). L'utilisation de chauffe-eau instantanés est mal connue : on fait l'hypothèse que leur utilisation reste marginale et représente une faible consommation. Ils ne seront donc pas modélisés dans la suite. Les chauffe-eau thermodynamiques représentent 2% des systèmes installés, ils ne seront pas pris en compte dans la suite de l'étude.

2.3. CREATION D'UN PARC REPRESENTATIF DE LA FRANCE

L'objectif est de modéliser un parc de logements réduit, représentatif de l'ensemble des logements français. Cela permet de conserver une diversité de systèmes et de comportements, d'utiliser des études de références à l'échelle nationale pour l'identification des paramètres mal connus et de réduire

les temps de calcul. Ce parc réduit permettra notamment de valider les consommations d'énergie annuelles (usage par usage) dans Smart-E, à l'échelle nationale.

La base de données « Recensement de la population 2012 » (INSEE, 2015) est utilisée pour la création du parc. Cette base de données contient notamment des informations sur le bâti (période de construction, surface), les occupants (nombre, âge, emploi), sur l'énergie utilisée pour le chauffage et sur la localisation. Elle ne contient pas d'informations sur les chauffe-eau : les technologies utilisées seront donc attribuées aux logements de manière à respecter les statistiques nationales. Les chauffe-eau électriques à accumulation sont attribués en priorité aux logements qui possèdent un système de chauffage électrique (34% des logements) les 10% restant sont distribués aléatoirement sur les logements utilisant d'autres sources d'énergie. Les volumes des ballons d'eau chaude sont issus des statistiques de ventes (VHK, 2007) et sont distribués en fonction de la surface des logements : les volumes faibles pour les petites surfaces et les volumes importants pour les grandes surfaces (tableau 2).

Volume (l)	80	100	150	200	400
Proportion (%)	5.5	3.3	13.7	60.5	17.0

Tableau 2 : Volume de vente des ballons d'eau-chaude en France, hors production instantanée

Le parc réduit doit être constitué d'un nombre suffisant de logements pour représenter la diversité de comportements, de systèmes et générer un profil de consommation électrique similaire au territoire français. Le parc réduit respecte un certain nombre de critères descriptifs présentés dans le tableau 3.

Désignation	Valeurs cibles	Erreur relative du parc réduit
type de logement	collectifs : 41.9% individuels : 58.1%	< 5%
Energie principale pour le chauffage	électricité : 32% gaz naturel : 35.9% fioul : 13.7%	
nombre d'occupants moyen	2.26	
surface de logement moyen	91 m²	

Tableau 3 : Critères de représentativité retenus pour la validation du parc réduit

En définitive, le parc réduit est créé en piochant de manière pseudo-aléatoire 10 000 logements de la base de données « Recensement de la population 2012 ». Ce nombre est choisi de manière à pouvoir réaliser la simulation en un temps raisonnable et avoir un niveau d'agrégation suffisant, même pour des systèmes présents dans une proportion réduite des logements. Ce parc réduit est jugé représentatif du parc français dans la mesure où il respecte les 7 critères présentés dans le tableau 3.

2.4. MODELISATION DES PUISAGES D'EAU CHAUDE

Afin de disposer des débits de puisage d'eau chaude représentatifs de la diversité de comportements, nous utilisons l'enquête emploi du temps de l'INSEE (INSEE, 2012). Cette enquête est constituée de 19 000 carnets d'activité de 24h décrivant, toutes les 10 minutes, les activités réalisées par les personnes interrogées. Chaque carnet est pondéré pas un coefficient pour que l'ensemble de l'étude soit représentatif de la population française. Parmi les activités décrites dans les carnets et susceptibles de générer une consommation d'eau chaude, seules les activités liées aux soins des personnes (douches) et à la cuisine (vaisselles) sont retenues. La diversité de comportement est liée au moment et à la durée des activités. Des profils de puisage unitaire d'une semaine sont créés en

séparant les jours travaillés des jours chômés (samedi et dimanche) et l'activité principale de la personne interrogée. Nous ne disposons pas de données suffisantes pour associer des débits de puisage spécifiques à chaque activité. Le débit est donc choisi comme paramètre d'ajustement pour retrouver l'énergie consommée pour l'usage ECS. Les données de l'AICVF (COSTIC, 2014) sont comparées avec les puisages calculés afin de valider la forme d'un profil de puisage agrégé. Les séries temporelles de la figure 1 sont normalisées par leur valeur maximale.

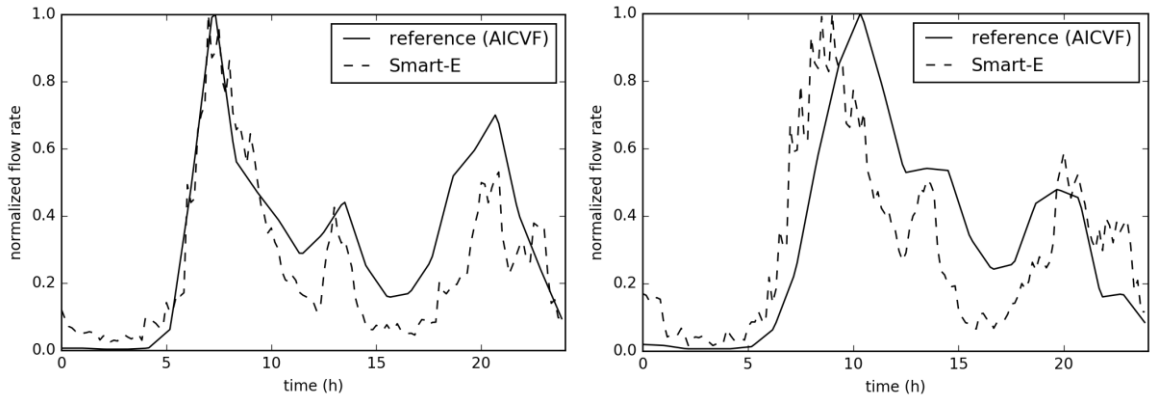

Figure 1 : Elément de validation de la forme des profils de puisage d'eau chaude : jour de semaine à gauche (R^2=0.67), jour de weekend à droite (R^2=0.5)

Les puisages simulés dans Smart-E et ceux de l'AICVF sont ressemblants malgré leur faible corrélation. On remarque la présence de 3 pics de consommation : le matin, le midi et le soir pour les deux courbes. Les pointes ont lieu au même moment sauf le weekend où la pointe du matin est environ 1 heure plus tôt pour Smart-E que pour l'AICVF. Les creux de milieu de matinée et de milieu d'après-midi sont plus marqués dans Smart-E. Ceci peut s'expliquer par un phénomène de lissage des données AICVF qui sont au pas de temps d'une heure, contre 10 minutes pour Smart-E. On rappelle que le même débit est utilisé pour tous les puisages d'eau chaude, ce qui peut créer un biais important dans les simulations. Cette comparaison permet une validation visuelle des hypothèses de simulation des puisages d'eau chaude.

2.5. MODELE PHYSIQUE DE CHAUFFE-EAU ELECTRIQUE

Un modèle de bilan énergétique sur un volume d'eau du ballon est proposé (figure 3), il est inspiré de Celador (Celador, et al., 2011). Les phénomènes de stratification et de thermosiphon ne sont pas modélisés, les variations de température sont supposées uniformes sur le volume d'eau supérieur représentant 67% du volume total. Par un changement de variable (température vers hauteur de l'interface) il est possible de retrouver le modèle à deux strates : une strate chaude et une strate froide avec une hauteur de déclenchement en fonction de la position de la couche d'interface entre les deux.

Pour un chauffe-eau non commandé, le chauffage se déclenche lorsque la température d'eau est inférieure à une valeur seuil, ce jusqu'à ce que la température maximale soit atteinte. Lorsque qu'il est commandé, il reçoit un ordre de démarrage toutes les 24h et le chauffage fonctionne jusqu'au moment où la température d'eau atteint la valeur maximale. Le système commandé peut se remettre en route à nouveau dans la période HC en cas de puisage. On suppose le système non utilisé lorsque la température d'eau est inférieure à 37°C.

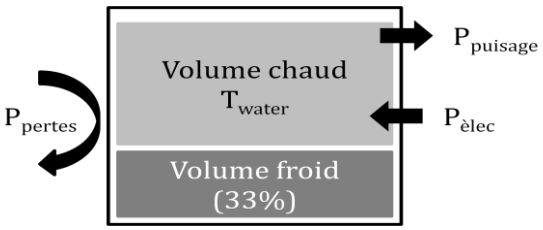

Figure 2 : Représentation du modèle de chauffe-eau électrique

- Les pertes thermiques de stockage (P_{pertes}) sont calculées de la manière suivante : $P_{pertes} = UA * (T_{water} - 20)$, avec UA les déperditions en W/K (Wilkenfeld, et al., 2013)
- La puissance de puisage ($P_{puisage}$) correspond à un débit d'eau à 60°C.
- La puissance électrique ($P_{élec}$) est fixée à 12 watts par litre de stockage

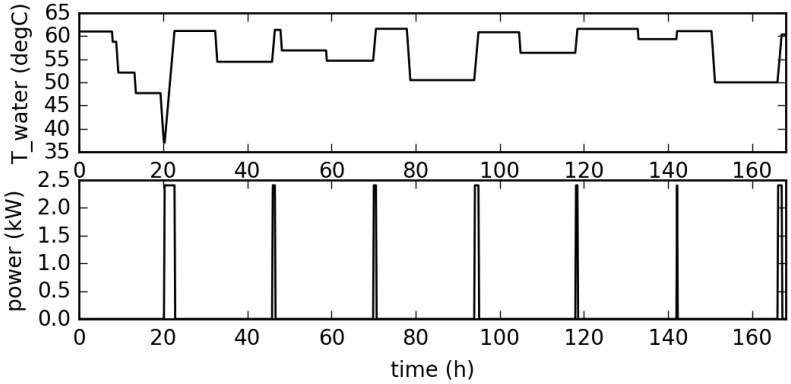

Figure 3 : Exemple d'une semaine de fonctionnement d'un chauffe-eau, ballon de 200 litres piloté

3. CALIBRATION DU MODELE

3.1. CALIBRATION DES DEBITS D'EAU MOYENS

Le débit de puisage est choisi comme paramètre pour la calibration de la consommation énergétique du parc national de chauffe-eau électriques. Il existe des données de débits normalisés pour chaque utilisation d'eau chaude, mais il ne nous est pas possible de les relier aux activités de l'enquête « Emplois Du Temps » car les informations sur la nature des activités ne sont pas assez précises. Dans une première approche, un débit moyen de puisage d'eau chaude à 60°C est utilisé pour tous les logements. Le parc de logements réduit, représentatif de la France, est utilisé. Il est constitué d'environ 4700 chauffe-eau à accumulation, qui sont modélisés dans leur totalité. L'énergie annuelle simulée dans Smart-E est comparée avec la consommation d'ECS obtenue par le modèle RTE pour l'année 2014 (RTE, 2015). La relation liant le débit et l'énergie étant linaire, il est facile d'obtenir exactement la consommation cible de 20.6 TWh ou 1500 kWh/an par appareil. Cette consommation est obtenue pour un débit moyen de 0.9 l/min. Le tableau 4 compare ce débit avec les valeurs de références (COSTIC, 2014).

provenance	usages	débit à 60°C (l/min)	durée (min)	volume (l)
Smart-E	tous usages	0.9	10*	9
Norme (EN 13203)	vaisselle	3.6	1.5 à 3.5	5.4 à 12.6
	douche	5.4	4.5 à 5.7	24.3 à 30.8
AICVF	vaisselle	3	3 à 5	9 à 15
	douche	2.5 à 5	3 à 6	8 à 35

Tableau 4 : Comparaison des débits Smart-E avec les valeurs de références.

La durée de puisage minimum dans Smart-E est de 10 minutes ce qui crée un biais dans la modélisation des événements qui durent moins de 10 minutes (douches par exemple). Ceci explique le débit faible identifié. En comparant les volumes d'eau puisés par événement modélisé et non les débits, on retrouve des valeurs compatibles avec les valeurs de l'AICFV.

3.2. IDENTIFICATION DU MODE DE PILOTAGE

La part des chauffe-eau commandés et la distribution horaire de leur mise en route par ERDF ne sont pas connues. Nous proposons d'identifier ces paramètres à partir de la reconstitution journalière de la forme de la courbe de charge (CdC) électrique nationale de RTE (RTE, 2015), ceci en minimisant l'écart entre la forme de la courbe de référence avec la forme de la courbe de charge simulée par Smart-E. Pour réduire la dimension du problème, on pose les hypothèses suivantes :

- Les ordres de mise en route peuvent avoir lieu en heures creuses uniquement, soit la nuit entre deux valeurs à identifier, soit la journée entre deux valeurs à identifier.
- La forme de la fonction de probabilité de mise en route est à identifier entre une distribution uniforme ou log-normale de variance 1.

Une méthode d'optimisation heuristique est choisie pour l'identification des paramètres (tableau 5)

Paramètres à identifier	Valeurs identifiées
Proportion d'appareils non commandés	15%
Densité de probabilité en journée	11h30 – 14h10 log-normale (9%)
Densité de probabilité la nuit	21h30 – 00h00 : uniforme (38%) 00h00 – 02h00 : uniforme (25%) 02h00 : 3h50 : uniforme (13%)

Tableau 5 : Résultats de l'identification des ordres de mise en route

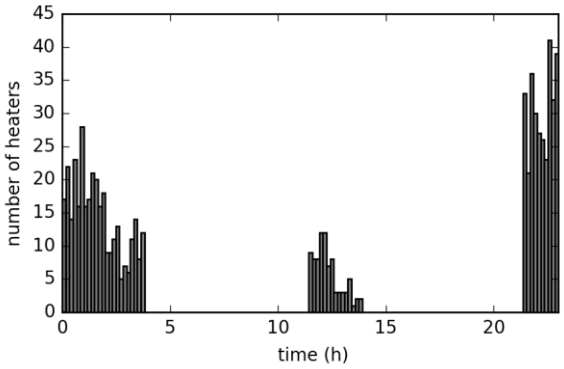

Figure 4 : Distribution des ordres de mise en route pour 780 chauffe-eau électriques commandés

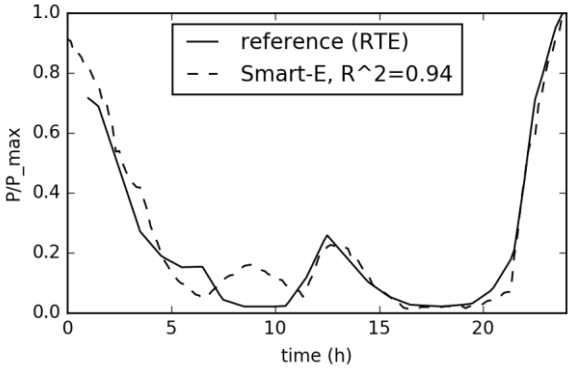

Figure 5 : Puissance électrique normalisée, comparaison sur une journée de janvier

La figure 4 représente la répartition des ordres de mise en route des 85% de chauffe-eau électriques commandés. Le modèle de parc de chauffe-eau électriques identifié est proche de la référence (figure 5), cependant des phénomènes sont mal modélisés entre 5 h et 11h. En effet, la CdC simulée ne présente pas le plateau observé entre 5h et 6h sur la CdC de référence. Cette différence peut s'expliquer par un manque d'information sur les températures de déclenchement des ballons commandés qui peuvent se relancer en fin d'HC en cas de puisage tôt le matin. De plus, un pic de consommation est observé vers 9h sur la CdC simulée, absent de la référence. Ce pic provient des chauffe-eau non commandés, qui sont essentiellement sollicités le matin (voir figure 1).

4. CONCLUSION

Un modèle *bottom-up* de parc de chauffe-eau électrique a été construit sur la base d'enquêtes nationales et d'un modèle physique d'accumulation simplifiée. Les paramètres non connus (débit de puisage, probabilité de mise en route) ont été identifiés afin de minimiser l'erreur sur la prévision de la courbe de charge nationale agrégée et sur la consommation annuelle de l'usage ECS. Les possibilités d'amélioration du modèle sont nombreuses, on retiendra notamment le manque d'information sur les usages de l'ECS pour pouvoir adapter les débits d'eau chaude en fonction des usages.

Le modèle de parc identifié, et dans une certaine mesure validé, permettrait de tester des stratégies de décalage de charge d'ECS pour favoriser l'autoconsommation de la production locale d'énergies et le développement des offres d'effacement. Ce modèle, peu coûteux en temps de calcul, a l'avantage de pouvoir être paramétré en fonction des évolutions des usages ou des technologies.

5. BIBLIOGRAPHIE

ADEME, 2013. Baromètre 10 000 ménages : Les ménages français face à l'efficacité énergétique de leur logement. *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.*

Atikol, U., 2013. A simple peak shifting DSM (demand-side management) strategy for residential water heaters. *Energy,* Issue 63.

Berthou, T. et al., 2015. SMART-E: A TOOL FOR ENERGY DEMAND SIMULATION AND OPTIMIZATION AT THE CITY SCALE. *Building Simulation 2015.*

Celador, A. C., Odriozola, M. & Sala, J., 2011. Implications of the modelling of stratified hot water storage tanks in the simulation of CHP plants. *Energy Conversion and Management,* Issue 52.

COSTIC, 2014. PACTE ECS - Les besoins d'ECS en habitat - Raport final.

CRE, 2013. Le fonctionnement des marchés de détail français de l'électricité et du gaz naturel. *Commission de régulation de l'énergie.*

ERDF, 2016. Site internet. *http://www.erdf.fr/classes-temporelles, consutlé le 15/03/2016.*

INSEE, 2012. Enquette Enplois du Temps 2010. *http://www.insee.fr/, consulté le 15/03/2016.*

INSEE, 2015. Recensements de la population 2012. *http://www.insee.fr/, consulté le 15/03/2016.*

Kepplinger, P., Huber, G. & Petrasch, J., 2015. Autonomous optimal control for demand side management with resistive domestic hot water heaters using linear optimization. *Energy and Buildings,* Issue 100.

Moreau, A., 2011. Control Strategy for Domestic Water Heaters during Peak Periods and its Impact on the Demand for Electricity. *ICSGCE 2011.*

RTE, 2015. Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France. *http://www.rte-france.com/fr/article/bilan-previsionnel, consulté le 15/03/2016.*

VHK, 2007. Eco-design of water heaters. *European commission, final report.*

Wilkenfeld, G. et al., 2013. Heat Pump Water Heaters: Potential for Harmonization of International Test Standards. *Final report, On behalf of CLASP.*