

Dimensionnement et gestion d'un système de stockage thermique par hydro-accumulation : application à la chaufferie multi-énergie de Maromme

Mouchira Labidi, Julien Eynard, Olivier Faugeroux, Stéphane Grieu

► **To cite this version:**

Mouchira Labidi, Julien Eynard, Olivier Faugeroux, Stéphane Grieu. Dimensionnement et gestion d'un système de stockage thermique par hydro-accumulation : application à la chaufferie multi-énergie de Maromme. 5èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, Jul 2013, Strasbourg, France. 5, pp.Communication JD-6.1, Session JD-6 : Modélisation et identification, 2013. <hal-00844548>

HAL Id: hal-00844548

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00844548>

Submitted on 15 Jul 2013

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.

Dimensionnement et gestion d'un système de stockage thermique par hydro-accumulation : application à la chaufferie multi-énergie de Maromme

Mouchira LABIDI^{1,3}, Julien EYNARD^{1,2}, Olivier FAUGEROUX^{1,2}, Stéphane GRIEU^{1,2}

¹Laboratoire PROMES-CNRS, UMR 8521
Rambla de la Thermodynamique, Tecnosud, 66100 Perpignan, France

²Université de Perpignan Via Domitia
52 Avenue Paul Alduy, 66860 Perpignan, France

³Cylergie, Centre de Recherche de Cofely GDF-Suez
L'Orée d'Écully, Bâtiment C, Chemin de la Forestière, 69130 Écully, France

{mouchira.labidi ; julien.eynard ; olivier.faugeroux ; stephane.grieu}@promes.cnrs.fr

Résumé— Les travaux présentés portent sur le dimensionnement et sur la stratégie de gestion d'un système de stockage thermique de type hydro-accumulation destiné à une chaufferie collective multi-énergie (ou mixte). La gestion proposée s'accompagne de la définition de critères énergétiques et économiques permettant d'optimiser le dimensionnement de ce système de stockage. L'approche développée est testée sur une chaufferie en cours de construction située à Maromme (Haute-Normandie) et gérée par Cofely GDF-Suez, le partenaire industriel du projet OptiEnR 2. La stratégie de gestion proposée permet la prise en compte des spécificités de cette chaufferie. Les résultats obtenus montrent qu'un dimensionnement optimal du système de stockage et une gestion intelligente du procédé permettent d'optimiser le fonctionnement du site. Des économies énergétiques et financières importantes sont ainsi réalisées.

Mots-clés— Chaufferie collective, mix-énergétique, stockage thermique, hydro-accumulation, dimensionnement optimal, gestion, graphe d'état, commande séquentielle.

I. INTRODUCTION

Afin de répondre aux objectifs européens en matière de développement des énergies renouvelables et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, des mesures réglementaires et des engagements visant à favoriser l'utilisation de l'énergie bois ont été prises en France (Grenelles de l'environnement 1 et 2) [1]. Le retour du chauffage collectif au bois, après plusieurs années d'individualisation des modes de chauffage, peut contribuer de façon significative à la réalisation de ces objectifs. En effet, les chaufferies collectives dites "mixtes" ou "multi-énergies" ont recours à de l'énergie fossile (du gaz et/ou du fioul) et à de l'énergie renouvelable (du bois). Pour ce type de procédés industriels, l'objectif des exploitants est d'optimiser le fonctionnement des chaudières en privilégiant l'énergie biomasse, plus économique que l'énergie fossile [2], et ainsi faire des économies financières. Le recours au gaz et/ou au fioul permet de compléter l'énergie produite par la combustion du bois lors de pics de consommation, notamment au cours de la saison froide. Une solution envisagée pour optimiser ces procédés est d'utiliser un système de stockage thermique par hydro-accumulation.

Couplé à une ou plusieurs chaudières bois, un système d'hydro-accumulation permettant de stocker le surplus de chaleur produit pendant les creux de consommation et de le

restituer lors des pics, peut se révéler particulièrement pertinent afin de diminuer le taux de couverture fossile. L'implantation d'un système justement dimensionné est un investissement rentable permettant à la fois une réduction significative des coûts énergétiques et une optimisation du fonctionnement du procédé industriel. L'impact sera également écologique et social. En effet, cette solution limite les émissions de polluants dans l'atmosphère [10] alors qu'une utilisation massive du bois, généralement une ressource locale, permet de promouvoir les emplois dans cette filière.

Le recours à l'hydro-accumulation pour le stockage d'énergie thermique, avec stratification [8], s'est plutôt développé dans les pays aux climats très rigoureux (régions continentales, nordiques et montagnardes) où les écarts entre températures diurnes et nocturnes sont très importants. Le terme hydro-accumulation indique bien évidemment que l'eau est le vecteur du stockage de l'énergie thermique.

Les principaux travaux issus de la littérature traitant de l'implantation d'un système de stockage et de son dimensionnement optimal concernent de petites installations thermiques, à l'échelle d'un bâtiment (chaudière biomasse [14], système solaire [9,12]), ou, à plus grande échelle, les centrales thermiques solaires [13,11] ou à cogénération (électricité et chaleur) [15]. Les problématiques rencontrées sont donc d'une autre nature que celles qui concernent les chaufferies collectives mixtes. Par ailleurs, en France, le recours à des systèmes de stockage thermique n'est que très rarement envisagé par les différents exploitants de chaufferies. Cependant, le contexte environnemental actuel ainsi que l'augmentation du coût des énergies fossiles renforcent l'intérêt de ces derniers pour ce type de solution.

Actuellement en cours, le projet de recherche OptiEnR 2 implique notamment la société Cofely GDF-Suez, qui exploite des chaufferies collectives mixtes sur l'ensemble du territoire français, et le laboratoire PROMES-CNRS. Ce projet a pour objectif principal l'étude de la pertinence de l'implantation au sein de chaufferies collectives mixtes de systèmes de stockage thermique et le développement d'approches avancées et performantes de gestion/régulation de ces systèmes. Il fait suite au projet OptiEnR, terminé en 2010 et qui a traité cette même problématique à travers l'étude complète en simulation d'une chaufferie collective située à La Rochelle (France).

L'intérêt économique de l'implantation d'un système de stockage thermique piloté par un contrôleur prédictif a pu être démontré [3-7] pour ce cas particulier. Le projet actuel vise à généraliser et à simplifier cette approche afin de l'étendre à d'autres chaufferies collectives. Il s'agit ainsi de développer un outil adaptatif permettant d'optimiser le dimensionnement des systèmes d'hydro-accumulation sur la base d'informations succinctes, telles que les puissances des chaudières et les configurations hydrauliques des différents générateurs, et de définir une stratégie de gestion prédictive conduisant à l'optimisation de critères énergétiques et économiques.

Le travail présenté par cet article décrit la première version de cet outil. Celui-ci n'intègre pas pour le moment de contrôle prédictif mais une première stratégie de gestion séquentielle permettant d'améliorer sensiblement le fonctionnement de chaufferies équipées d'un système de stockage thermique.

La première partie de l'article est consacrée à la description de la stratégie de gestion d'un système de stockage proposée, à l'utilisation des chaudières ainsi qu'aux critères retenus pour le dimensionnement de ce système. La seconde partie de l'article concerne l'application de cet outil à un cas réel : la chaufferie collective de Maromme (Haute-Normandie).

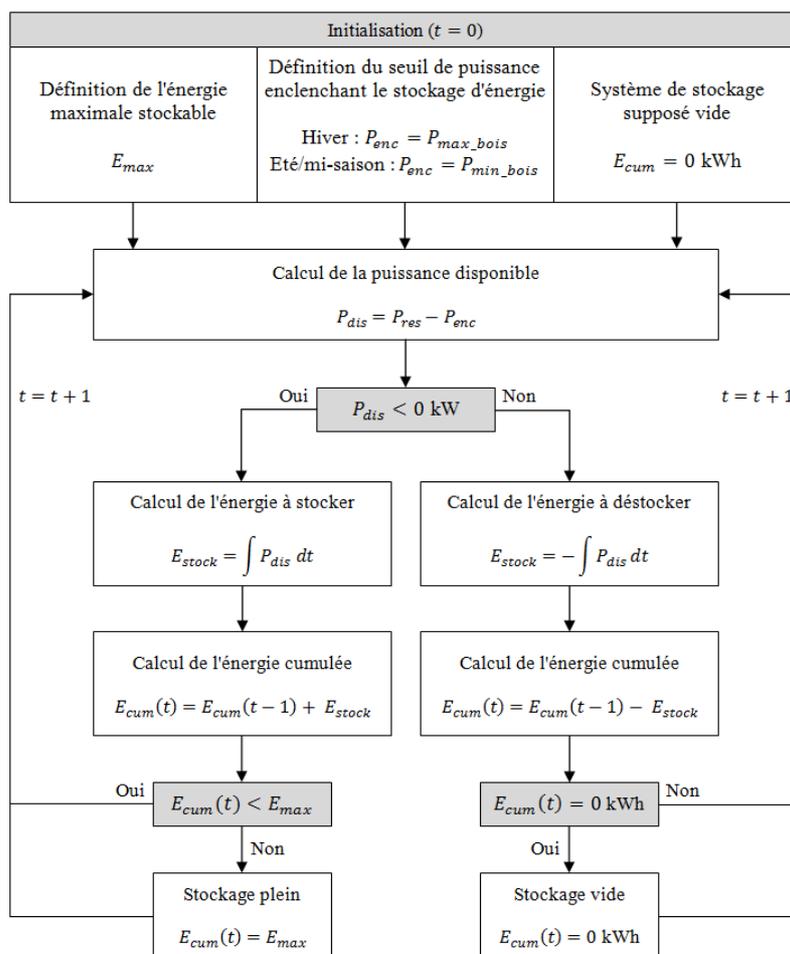


Fig. 1. Stratégie de gestion d'un système de stockage thermique par hydro-accumulation

II. GESTION ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME DE STOCKAGE ET DES GÉNÉRATEURS

A. Problématiques soulevées par les chaufferies collectives

Les chaufferies collectives auxquelles nous nous intéressons sont exploitées par Cofely GDF-Suez. Elles présentent des particularités qu'il est nécessaire de prendre en compte pour le développement d'une approche optimisée de gestion. Elles comprennent un ou plusieurs générateurs biomasse utilisés comme générateurs principaux et un ou plusieurs générateurs gaz utilisés en appoint. Ces chaufferies fournissent à des habitats et à des bâtiments publics, par l'intermédiaire d'un réseau de chaleur, du chauffage pendant la saison froide et de l'eau chaude sanitaire toute l'année. Des comportements très différents sont ainsi observés selon les saisons : des pics de consommation importants pendant l'hiver, une consommation plus réduite mais extrêmement variable à la mi-saison et une

consommation faible mais peu variable pendant l'été. Ces comportements entraînent une utilisation importante du gaz pendant l'hiver, une variation importante de la charge biomasse au cours de la mi-saison (donc des successions rapides de mise en marche et d'arrêt des chaudières bois lorsqu'il y a plusieurs générateurs biomasse) et la surproduction de chaleur pendant l'été, entraînant l'arrêt thermostatique des chaudières bois lorsque la puissance réseau devient trop faible.

B. Stratégie de gestion du système de stockage

Une gestion intelligente du système de stockage permet de garantir le fonctionnement optimal de la chaufferie. Il faut donc définir une stratégie de fonctionnement basée sur la puissance demandée par le réseau de chaleur ainsi que sur les caractéristiques des générateurs (bois et gaz). Au cours de l'année, trois scénarios de fonctionnement peuvent ainsi être envisagés pour une chaufferie collective.

Scénario 1 : période froide (hiver). Les générateurs biomasse (les chaudières bois) surproduisent de l'énergie lors des creux de consommation (la puissance demandée par le réseau de chaleur est inférieure à la puissance maximale de ces chaudières bois), le surplus étant stocké. Par la suite, cette énergie est déstockée afin de retarder voire d'empêcher l'enclenchement des chaudières gaz lors des pics de consommation (la puissance demandée par le réseau de chaleur est supérieure à la puissance maximale bois). Dans ce cas, le système de stockage joue le rôle de système d'appoint et permet donc de minimiser la consommation de gaz.

Scénario 2 : mi-saison. La puissance des chaudières bois varie fortement afin de répondre à des appels de puissance très variables. Ainsi, les phases de démarrage et d'arrêt sont nombreuses sur des périodes relativement courtes. Le rôle du système de stockage est alors de permettre aux chaudières bois de fonctionner sur la base de cycles plus longs, en diminuant le nombre de transitions marche/arrêt. Le système de stockage permet de lisser le fonctionnement des chaudières bois : stocker de l'énergie pour éviter l'arrêt d'un générateur bois ou déstocker de l'énergie pour éviter le démarrage d'un générateur bois.

Scénario 3 : période chaude (été). Il est possible de satisfaire les besoins en eau chaude sanitaire grâce au plus petit des générateurs biomasse. Le rôle du système de stockage est alors de stocker de l'énergie afin d'empêcher l'arrêt de ce générateur lorsque la puissance demandée par le réseau de chaleur devient trop faible et de diminuer ainsi les transitions marche/arrêt.

L'algorithme de gestion du système de stockage par hydro-accumulation est décrit de façon synthétique par la figure 1. Il doit pouvoir s'appliquer quelles que soient la chaufferie considérée et la période de l'année (scénario). À chaque pas de temps, la puissance disponible (P_{dis}) est calculée. Cette puissance est la différence entre la puissance demandée par le réseau de chaleur (P_{res}) et la puissance à partir de laquelle est enclenché le stockage ou le déstockage d'énergie (P_{enc}). Cette puissance dépend du scénario de fonctionnement. Ainsi, tant que la puissance disponible est non nulle, le système de stockage par hydro-accumulation se remplit, jusqu'à ce que l'énergie cumulée (E_{cum}) soit égale à l'énergie maximale stockable (E_{max}). Le système de stockage est alors plein. Inversement, c'est le déstockage d'énergie qui s'opère jusqu'à ce que le système soit vide ($E_{cum} = 0$ kWh).

C. Critères pour le dimensionnement du système de stockage

Un système de stockage n'est efficace et économiquement rentable que s'il est correctement dimensionné. Un trop grand volume induit un investissement trop important et qui n'est jamais rentabilisé alors qu'un volume trop faible génère une faible amélioration du fonctionnement. Ainsi, est défini un critère Ec permettant d'évaluer le gain économique annuel lié à l'implantation de ce système, en fonction du coût des différents combustibles (1) :

$$Ec = Ec_{gaz} \times PU_{gaz} - Sc_{bois} \times PU_{bois} \quad (1)$$

avec Ec_{gaz} la diminution de la consommation annuelle de gaz (2) et Sc_{bois} la surconsommation annuelle de bois (3).

$$Ec_{gaz} = (E_{gaz})_{sans\ stockage} - (E_{gaz})_{avec\ stockage} \quad (2)$$

$$Sc_{bois} = (E_{bois})_{avec\ stockage} - (E_{bois})_{sans\ stockage} \quad (3)$$

où PU_{gaz} est le prix unitaire d'un kWh de gaz, PU_{bois} le prix unitaire d'un kWh de bois, E_{gaz} l'énergie annuelle consommée issue de la combustion du gaz et E_{bois} l'énergie annuelle consommée issue de la combustion du bois.

Cette économie doit être comparée au coût du système de stockage Cs défini à partir de réalisations existantes [13]. Ce dernier varie non linéairement en fonction du volume de stockage. En effet, le coût du m³ diminue avec l'augmentation du volume. On peut alors définir le Temps de Retour Brut sur investissement (TRB), à savoir le nombre d'années nécessaires afin que le cumul des gains économiques annuels compense l'investissement consenti (4) :

$$TRB = Cs/Ec \quad (4)$$

Par ailleurs, on peut en déduire G , le gain réalisé sur la durée totale de l'exploitation d'un site D_{exp} (5) :

$$G = (D_{exp} - TRB) \times Ec \quad (5)$$

Enfin, l'implantation d'un système de stockage thermique améliore le taux de couverture bois T_{bois} (6) :

$$T_{bois} = E_{bois}/(E_{bois} + E_{gaz}) \quad (6)$$

Les différents exploitants désirent d'autre part connaître la consommation maximale d'énergie par le réseau de chaleur (H) pour laquelle la chaufferie pourra garantir le taux de couverture bois fixé contractuellement. Cet élément doit donc être pris en compte lors du dimensionnement des différents équipements d'un site afin de pouvoir répondre aux éventuels raccordements pouvant avoir lieu. Enfin, pour la maintenance d'une chaufferie, il est primordial que le fonctionnement des chaudières bois soit le plus continu possible, ce qui limite les changements d'état de ces générateurs. Nous nous intéresserons donc également à N , le nombre de transitions marche/arrêt des chaudières bois. Le volume optimal du système de stockage sera défini en maximisant le gain G . L'impact sur H et sur N sera étudié à partir du volume optimal déterminé.

III. UN CAS D'ÉTUDE : LA CHAUFFERIE DE MAROMME

A. Présentation de la chaufferie

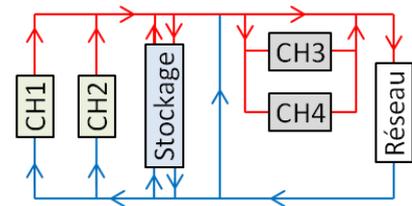


Fig.2. Synoptique simplifié de la chaufferie de Maromme

La nouvelle chaufferie de Maromme (Haute-Normandie), d'une puissance totale de 20000 kW, alimentera, sur plus de 25 km, l'équivalent de 3000 logements. Le réseau de chaleur auquel sera raccordée la chaufferie est structuré comme suit : le réseau "bas Maromme" et le réseau "haut Maromme". La

conception, la réalisation, le financement et l'exploitation de la chaufferie, d'une durée (D_{exp}) de 24 ans, sont pris en charge par la société Cofely (groupe GDF-Suez). Le site est équipé de quatre générateurs : deux chaudières bois (CH1 avec $2160 \text{ kW} \leq P_{CH1} \leq 7200 \text{ kW}$ et CH2 avec $750 \text{ kW} \leq P_{CH2} \leq 2500 \text{ kW}$) qui assurent la production de chaleur, une chaudière gaz d'appoint (CH3) de 9700 kW et une chaudière gaz de secours (CH4) de 7500 kW. Un système de stockage thermique par hydro-accumulation est prévu (figure 2). La chaufferie est directement reliée au réseau "bas Maromme" alors qu'elle est reliée au réseau "haut Maromme" via deux échangeurs à plaques. Un condenseur de fumée pour les chaudières bois est installé sur le retour "haut Maromme", qui est plus froid que le retour "bas Maromme". La chaufferie comprend par ailleurs différents organes de régulation, des pompes et des vannes afin d'en assurer le bon fonctionnement. Enfin, l'exploitant a fourni pour l'étude des estimations à pas de temps horaire de la puissance demandée par le réseau de chaleur au cours d'une année (figure 3).

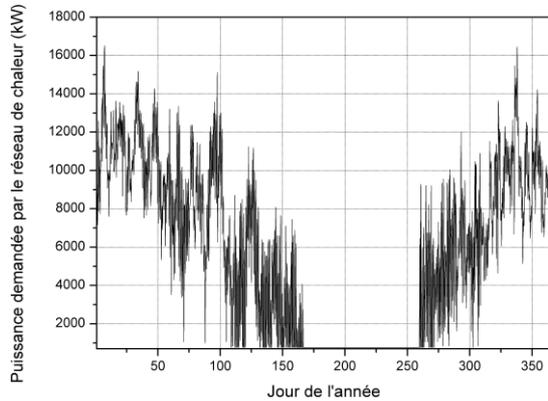


Fig. 3. Estimation annuelle de la puissance demandée par le réseau de chaleur

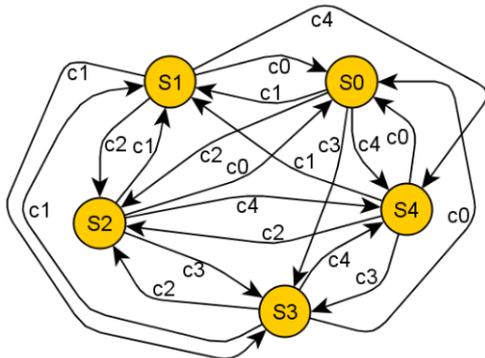


Fig. 4. Graphe de gestion de la chaufferie sans système de stockage

B. Stratégie de gestion du système de stockage

En se basant sur la puissance demandée par le réseau de chaleur P_{res} (figure 3) et les caractéristiques des chaudières bois, il est possible de décrire le fonctionnement de la chaufferie sans système de stockage par un graphe d'état (figure 4) comportant 5 états, chacun correspondant à une configuration d'utilisation des chaudières (table I). Cette configuration initiale (parmi quatre configurations possibles) a été retenue suite à une étude préliminaire. En effet, elle permet de minimiser, en fonctionnement, le nombre de transitions marche/arrêt pour les chaudières bois.

TABLE I
FONCTIONNEMENT DE LA CHAUFFERIE

État	Fonctionnement
S0	Aucune chaudière (problème)
S1	CH2
S2	CH1
S3	CH1 + CH2
S4	CH1 + CH2 + CH3
Transition	Condition
c0	$P_{res} < 750 \text{ kW}$
c1	$750 \text{ kW} \leq P_{res} < 2500 \text{ kW}$
c1a	$750 \text{ kW} \leq P_{res} < 2160 \text{ kW}$
c2	$2160 \text{ kW} \leq P_{res} < 2910 \text{ kW}$
c3	$2910 \text{ kW} \leq P_{res} < 9700 \text{ kW}$
c4	$P_{res} \geq 9700 \text{ kW}$
e0	$E_{cum} = 0 \text{ kWh}$
e1	$E_{cum} = E_{max}$

Notons que l'ensemble formé par les états S3 et S4, ainsi que leurs transitions partagées, correspond au scénario 1 (hiver) alors que celui formé par les états S1, S2 et S3 et leurs transitions partagées correspond au scénario 2 (mi-saison). Enfin, l'ensemble formé par les états S0 et S1, ainsi que leurs transitions partagées, correspond au scénario 3 (été). L'implantation d'un système de stockage thermique par hydro-accumulation modifie le graphe d'état. Sont ajoutés des états complémentaires, S_{xs} et S_{xd} , avec $x \in \{0,1,2,3,4\}$, correspondant respectivement à l'état S_x avec stockage ou déstockage d'énergie. Sont alors obtenus pour la gestion du système trois graphes d'état distincts, un par scénario de fonctionnement (figures 5, 6 et 7).

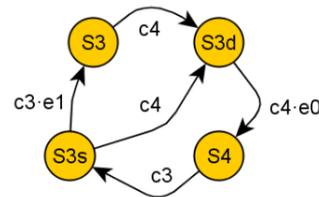


Fig. 5. Graphe de gestion avec système de stockage (scénario 1)

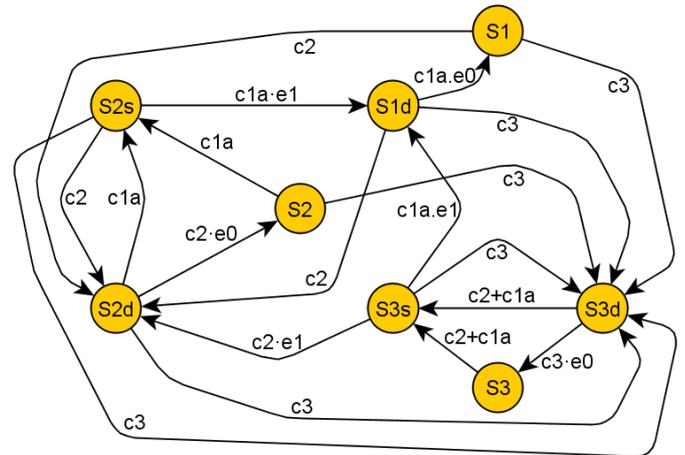


Fig. 6. Graphe de gestion avec système de stockage (scénario 2)

Notons que le cas problématique S0 (puissance demandée inférieure à la puissance minimale disponible) n'est plus considéré et est remplacé par l'état S0d, réalisable en pratique.

Enfin, la puissance P_{enc} varie selon le scénario : $P_{enc} = 9700$ kW pour le scénario 1, $P_{enc} = 750$ kW pour le scénario 3 et $P_{enc} = \{2160 ; 2910\}$ kW pour le scénario 2, selon les états.

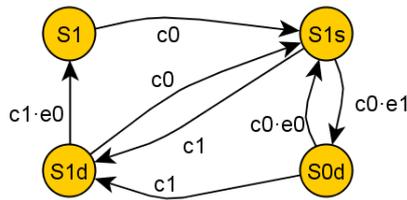


Fig. 7. Graphe de gestion avec système de stockage (scénario 3)

C. Dimensionnement optimal du système de stockage

L'impact du système de stockage sur les performances de la chaufferie a été étudié pour un volume compris entre 0 et 4000 m³. La figure 8 montre le gain économique annuel réalisé en fonction de ce volume. Il apparaît que le système de stockage permet de faire des économies financières jusqu'à un volume de 2200 m³, volume au delà duquel ce gain n'évolue plus. Le calcul du taux de retour brut ainsi que la prise en compte de la durée d'exploitation du site permettent de déterminer le gain économique global (figure 9) et donc de choisir le volume optimal : 1500 m³. Le gain atteint 223 k€ pour ce volume, soit un bénéfice net d'environ 9 k€ par an.

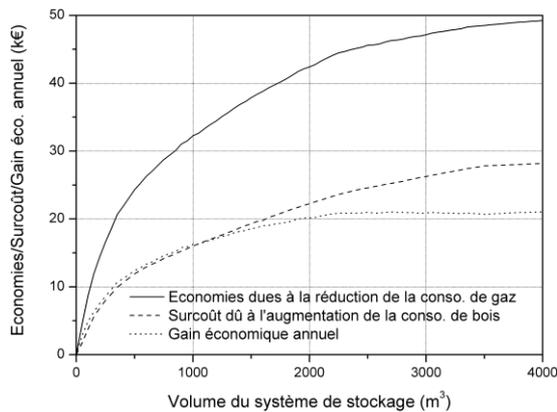


Fig. 8. Economies, surcoût et gain économique annuel en fonction du volume de stockage

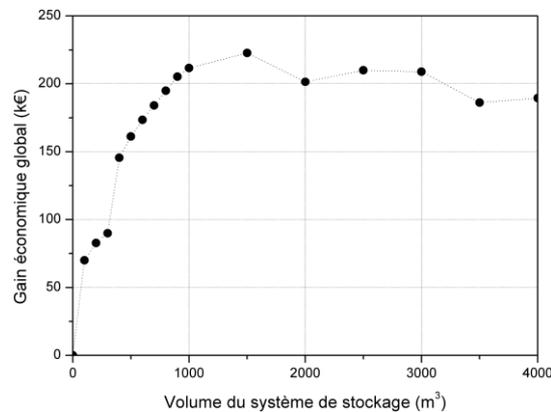


Fig. 9. Gain économique global en fonction du volume de stockage

Concernant le taux de couverture bois, les simulations montrent que les chaudières bois sont capables d'assurer 92,7 % des besoins énergétiques sans système de stockage par

hydro-accumulation (figure 10). L'ajout du système permet d'augmenter ce taux jusqu'à 95 %. Pour un volume optimal de 1500 m³, l'augmentation est de 1,8 points, soit 94,5 %.

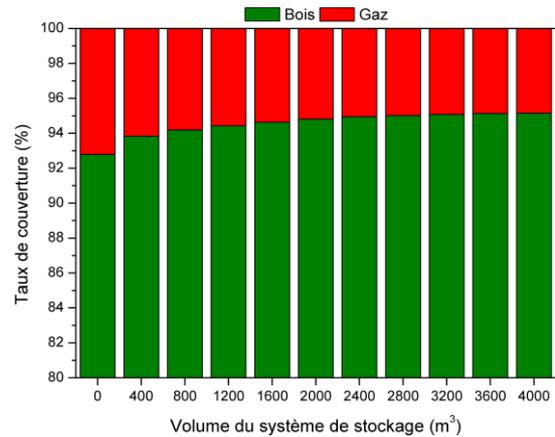


Fig. 10. Taux de couverture bois/gaz en fonction du volume de stockage

C. Étude comparative

Une étude comparative a été réalisée entre la configuration de référence (la chaufferie sans système de stockage par hydro-accumulation) et la configuration proposée (avec un système de stockage dimensionné de façon optimale). Les principaux résultats sont regroupés dans la table II.

TABLE II
RÉSULTATS DE L'ÉTUDE COMPARATIVE

Chaufferie	N	T_{bois} [%]	Ec [k€]	TRB [a]	G [k€]
Sans système de stockage	344	92,7	0	0	0
Avec système de stockage de 1500 m ³	24	94,5	18	12	223

La figure 11 montre l'impact sur le taux de couverture bois d'une augmentation de la demande d'énergie par le réseau de chaleur. Ainsi, pour satisfaire le taux de couverture bois contractuel de 92 % à Maromme, avec un volume de stockage optimal de 1500 m³, les besoins du réseau de chaleur ne doivent pas augmenter de plus de 5 %.

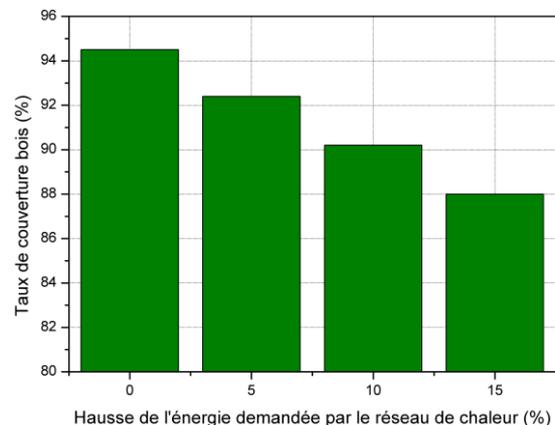


Fig. 11. Taux de couverture bois pour une hausse de l'énergie demandée par le réseau de chaleur, avec un système de stockage thermique de 1500 m³

Un exemple d'impact du système de stockage thermique sur le fonctionnement de la chaufferie de Maromme est donné par l'intermédiaire de l'évolution des puissances des chaudières bois (figure 12) et gaz (figure 13) au cours du mois de décembre (scénario 1). Il apparaît qu'une partie des pics de consommation de gaz est éliminée lorsque, préalablement, des creux de consommation ont permis aux chaudières bois de produire de l'énergie qui a pu être stockée dans les ballons.

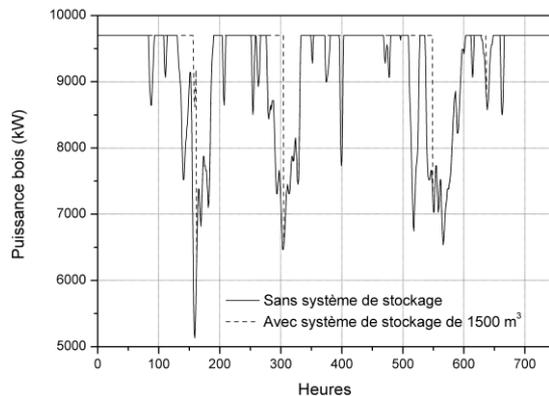


Fig.12. Dynamique des chaudières bois (CH1 et CH2) au mois de décembre (scénario 1)

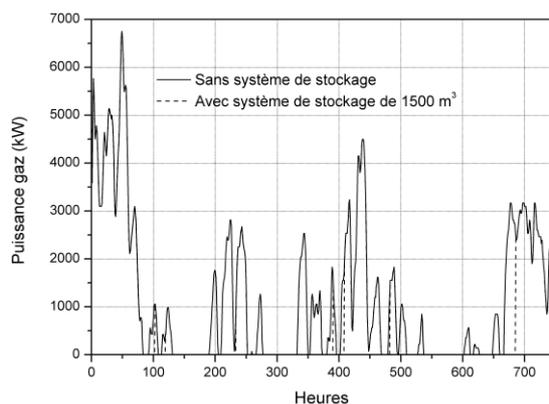


Fig.13. Dynamique de la chaudière gaz (CH3) au mois de décembre (scénario 1)

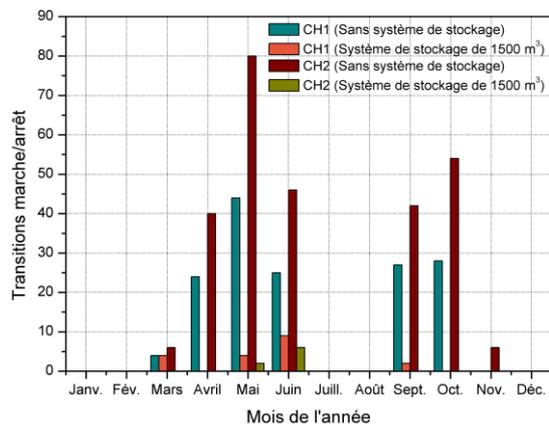


Fig.14. Nombre de transitions marche/arrêt pour CH1 et CH2

L'impact du système de stockage sur le fonctionnement des chaudières bois est également évalué à partir du nombre de transitions marche/arrêt de chaque chaudière. La figure 14 présente les résultats de cette étude. Ils montrent clairement que, pour un volume optimal de 1500 m^3 , ce nombre de

transitions est divisé par 14 (soit une diminution de 95 %), assurant ainsi une bien meilleure utilisation des équipements.

IV. CONCLUSION

Les travaux présentés portent sur le dimensionnement et sur la stratégie de gestion de systèmes de stockage thermique par hydro-accumulation destinés à des chaufferies collectives mixtes. Testé en simulation, l'outil développé démontre qu'il est possible d'obtenir, par un choix judicieux du volume du système de stockage, une économie financière significative sur la durée d'exploitation du site de Maromme. Une réduction importante du nombre de démarrages et d'arrêts des chaudières bois, permettant de diminuer les coûts de maintenance de ces générateurs, est par ailleurs observée. L'implantation sur site de cette première stratégie est d'ores et déjà prévue. Une stratégie plus évoluée sera également proposée, prenant en compte plus fidèlement la dynamique des chaudières à travers leur rendement ainsi que la stratification thermique au sein du système de stockage. Le développement d'un contrôleur prédictif anticipant les besoins du réseau de chaleur devrait permettre de gérer le stockage et le déstockage d'énergie de façon optimale et, ainsi, d'améliorer les résultats obtenus.

RÉFÉRENCES

- [1] ADEME, Évaluation prospective 2020-2050 de la contribution du secteur biomasse énergie aux émissions nationales de polluants atmosphériques – Synthèse, Novembre 2009.
- [2] Martin G., Guide d'exploitation des chaufferies : Exploitation et conduite des chaufferies de puissances supérieures à 400 kW, ATEE, 2010.
- [3] Eynard J. Gestion optimale de l'énergie dans un procédé multi-source pour le chauffage de bâtiments, Thèse de doctorat, Université de Perpignan Via Domitia, octobre 2010
- [4] Eynard J., Grieu S. et Polit M., Wavelet-based multi-resolution analysis and artificial neural networks for forecasting temperature and thermal power consumption, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 24, n° 3, pp. 501-516, 2011.
- [5] Eynard J., Grieu S. et Polit M., Modular approach for modeling a multi-energy district boiler, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 35, n° 8, pp. 3926-3957, 2011.
- [6] Eynard J., Grieu S. et Polit M., Predictive control and thermal energy storage for optimizing a multi-energy district boiler, *Journal of Process Control*, vol. 22, n° 7, pp. 1246-1255, 2012.
- [7] Eynard J., Grieu S. et Polit M., Optimal control of a multi-energy district boiler: a case study, 18th International World Congress of the International Federation of Automatic Control, IFAC WC 2012, Milan, Italie, 28 août – 2 septembre 2011.
- [8] Han Y. M., Wang R.Z. et Dai Y.J., Thermal stratification within the water tank. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 5, pp. 1014 -1026, 2009.
- [9] Knudsen S. Investigation and optimisation of heat storage tanks for low-flow SDHW systems. Thèse de doctorat, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2004.
- [10] Le Louer P. et Korchia J-L., Expertise de 10 chaufferies collectives au bois, analyse et recommandations, *Pollution Atmosphérique*, numéro spécial, mars 2009.
- [11] Powell K. M. et Edgar T. F., Modeling and control of a solar thermal power plant with thermal energy storage, *Chemical Engineering Science*, vol 71, pp. 138-145, 2012.
- [12] Rodríguez-Hidalgo M.C., Rodríguez-Aumente P.A., Lecuona A., Legrand M. et Ventas R., Domestic hot water consumption vs. solar thermal energy storage: The optimum size of the storage tank, *Applied Energy*, vol 97, pp. 897-906, 2012.
- [13] Schmidt T., Mangold D. et Müller-Steinhagen H., Central solar heating plants with seasonal storage in Germany, *Solar Energy*, vol. 76, n° 1-3, pp. 165-174, 2004.
- [14] Strižih U. et Butala V., Optimization of a thermal storage unit combined with a biomass boiler for heating buildings, *Renewable Energy*, vol. 29, n° 12, pp. 2011-2022, 2004.
- [15] Verda V. et Colella F., Primary energy savings through thermal storage in district heating networks, *Energy*, vol 36, n° 7, pp. 4278-4286, 2011.