

Intégration énergétique et optimisation économique d'une installation de cogénération

Ing. A. BERTRAND
Ir P. DEWALLEF
Ir V. KELNER
GRAMME – Liège

Cet article traite de toutes les étapes réalisées pour mener à bien un projet de dimensionnement d'un système de cogénération au sein d'un réseau de chaleur situé sur le site du campus de l'entreprise Solvay à Bruxelles. La définition des besoins électriques et thermiques du site, la pertinence et la faisabilité d'un tel projet, le bilan énergétique et environnemental, et enfin, l'étude de la rentabilité économique de l'installation de cogénération, sont autant d'éléments pris en compte dans cette étude.

Mots-clés : Cogénération, réseau de chaleur, chauffage, combustible, gaz à effet de serre, dimensionnement, analyse de consommation, étude de rentabilité.

This paper details all the stages realized for the dimensioning of a cogeneration system on a district heating located on the site of the campus of the company Solvay in Brussels. The definition of the electrical and thermal needs of the site, the relevance and the feasibility of such a project, the environmental and energy record, and eventually the study of the economic profitability of the cogeneration installation, are so many elements considered in this study.

Keywords: Cogeneration or Combined Heat and Power (CHP), district heating, heating system, fuel, greenhouse gases, dimensioning, analysis of the energy consumption, cost-effectiveness survey.

1. Introduction

La transition énergétique, qui prône une modification importante des moyens de production et de consommation de l'énergie, est l'un des grands défis de nos jours. Ce concept repose sur de nombreux enjeux tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la diminution de consommation d'énergie, l'évolution vers un système énergétique moins centralisé, le passage à un système énergétique plus sûr, etc. Un moyen attrayant aidant à atteindre ces objectifs ambitieux est la cogénération.

Le principe de la cogénération est de produire de l'électricité et de la chaleur, de façon combinée, à partir d'un seul combustible. Cette solution énergétique permet de valoriser la chaleur générée lors de la production d'électricité. Le fait de récupérer cette chaleur maximise le rendement global du système, ce qui permet de réaliser des économies d'énergie par rapport à des systèmes séparés de production de chaleur et d'électricité. Ce rendement plus élevé réduit par conséquent la consommation d'énergie primaire. Ce moyen de production présente donc l'avantage de réduire les émissions de CO₂. De plus, cette filière participe à la sécurité d'approvisionnement électrique vu que les pics de demande de chaleur coïncident généralement avec ceux de demande électrique et que le système permet de répondre à ces deux besoins simultanément.

Le sujet de cet article est le dimensionnement d'une cogénération qui va être intégrée dans la chaufferie gaz du réseau de chaleur du campus de l'entreprise Solvay situé à Bruxelles. La demande des responsables de cette entreprise est relativement simple : quel est le type de cogénération à installer, avec quelles puissances thermiques et électriques, afin que les coûts soient minimisés, c'est-à-dire que le temps de retour sur investissement soit le plus court possible ?

2. Présentation de l'établissement et analyse du besoin thermique

Avant d'étudier la faisabilité d'une installation de cogénération, il est important de cerner l'établissement étudié. De plus, la détermination du besoin thermique est une étape indispensable et primordiale pour effectuer un dimensionnement correct. Celui-ci s'effectue en analysant les consommations à partir de données réelles du site d'implantation.

Le contenu de cette section est consacré à la présentation du type d'établissement mais également à la description de l'installation thermique importante à connaître. En effet, une cogénération produit de la chaleur et de l'électricité mais est principalement dimensionnée à partir des besoins de chaleur car une production de chaleur

excédentaire sera perdue alors que de l'électricité en superflu peut être revendue sur le réseau.

2.1. Présentation de l'établissement étudié

Solvay est un groupe leader mondial de la chimie qui fabrique un grand nombre de produits chimiques et de plastiques. L'établissement étudié englobe une série de bâtiments puisqu'il s'agit du campus de l'entreprise, situé à Bruxelles. Celui-ci est le siège social de l'entreprise mais également un centre multi-sociétés. En effet, ce site loge le quartier général de Solvay, ainsi que des fonctions de supports et de recherches, mais également des entreprises externes. Ce campus est principalement composé de bureaux où près de 1 300 personnes travaillent.

2.2. L'utilisation des bâtiments et la régulation

L'utilisation des bâtiments est continue durant toute l'année mais uniquement en semaine. L'occupation des édifices correspond à un profil classique pour des bureaux, c'est-à-dire une utilisation principalement 5 jours sur 7, essentiellement de 7h à 18h.

Afin de connaître le type de régulation mis en place, une campagne de mesures a été menée. Des relevés des températures extérieures (via une sonde extérieure installée sur le site) et de l'eau de chauffage en sortie de chaudière, représentés sur la figure 1 ci-dessous, ont permis de connaître la régulation mise en place.

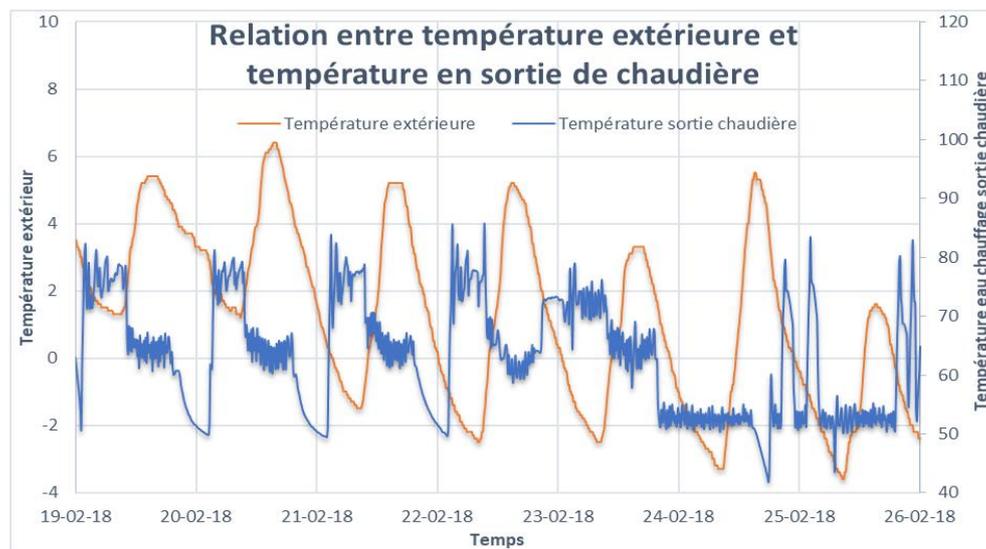


Figure 1 : Régulation

Ce graphique permet de constater que le profil de consommation diffère entre les jours de la semaine (du 19/02 au 23/02) et ceux du week-end. Du lundi au vendredi,

un arrêt nocturne a lieu : en effet, la production de chaleur se coupe vers 20h. Cet arrêt nocturne entraîne un pic de consommation matinal ayant pour but d'atteindre la température de consigne dans les locaux avant l'arrivée des premiers travailleurs.

Durant la matinée, la demande de chaleur est relativement constante et assez élevée, la température de l'eau en sortie de chaudière s'élève aux alentours des 80°C. Au cours de cette première période de la journée, les travailleurs arrivent. Les locaux doivent dès lors être maintenus à une certaine température alors que les parois des pièces sont relativement froides et que la température extérieure n'est pas fort élevée. Durant la seconde partie de la journée, la demande de chaleur est toujours plus ou moins constante mais est moindre par rapport au matin. En effet, ceci peut être expliqué par la température extérieure plus élevée et les apports internes réalisés par les occupants et les appareils électriques qu'ils utilisent, qui réchauffent en partie les locaux.

Durant le week-end, le mode de régulation diffère par rapport à celui des jours de la semaine. La température de l'eau dans le circuit est continuellement maintenue à environ 50°C. Cependant, lorsque la température d'un local descend en dessous d'un certain seuil, une alerte est envoyée pour redémarrer la production de chaleur par les chaudières. L'eau du circuit global ayant une température plus élevée, la pièce dépassant le seuil froid est réchauffée ainsi que tous les autres locaux reliés au circuit qui ne demandaient pas de chaleur supplémentaire.

2.3. La signature énergétique

La signature énergétique est un outil graphique intéressant qui établit l'évolution de la consommation de l'établissement étudié en fonction du climat, c'est-à-dire en fonction des degrés-jours.

La notion de degré-jour

La notion de degré-jour permet de quantifier le froid. Elle est indispensable pour la réalisation d'une comptabilité énergétique. En effet, l'apport d'énergie thermique par le chauffage est lié à l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Le suivi de consommation d'énergie serait donc inutile sans considérer les permutations climatiques.

Les degrés-jours de chauffage (ou HDD pour Heating Degree Days) mesurent l'écart de degrés entre la température moyenne de l'air extérieur et une température de base dans le cas où la première est inférieure à la seconde. Dans le cas contraire (lorsque qu'il fait relativement chaud), les degrés-jours sont équivalents à zéro.

La signature énergétique

La signature énergétique est le graphe présentant l'évolution des consommations en fonction des degrés-jours. Dessiner la signature énergétique revient à établir le lien entre la consommation d'un établissement et le climat. Sur le graphique, l'énergie consommée est représentée en ordonnée, tandis que l'abscisse indique les degrés-jours. Le rapport entre ces deux grandeurs est tracé par une droite de régression linéaire. Plus la pente de cette droite est importante, plus le bâtiment est sensible au climat, ce qui signifie par exemple que l'isolation est faible.

Comme expliqué précédemment, la régulation du chauffage diffère entre les jours de la semaine et ceux du week-end. Afin d'analyser au mieux les consommations de l'établissement, deux signatures énergétiques ont été dressées à partir des données disponibles.

Signature énergétique propre aux jours de la semaine

Le graphe ci-dessous représente la signature énergétique dessinée à l'aide des valeurs de consommation et de degrés-jours relatifs aux jours de la semaine. L'axe des y représente la consommation d'énergie thermique en kWh/jour tandis que les degrés-jours sont indiqués en abscisse. Le nombre de degrés-jours pour un jour donné correspond à la différence entre la température intérieure des bâtiments fixée dans ce cas-ci à 18°C et la moyenne des températures extérieures pour autant que celle-ci n'excède pas 18°C également. En d'autres termes, lorsque qu'il fait plus chaud que 18°C à l'extérieur, le nombre de degrés-jours équivaut à 0 et le système de chauffage est à l'arrêt.

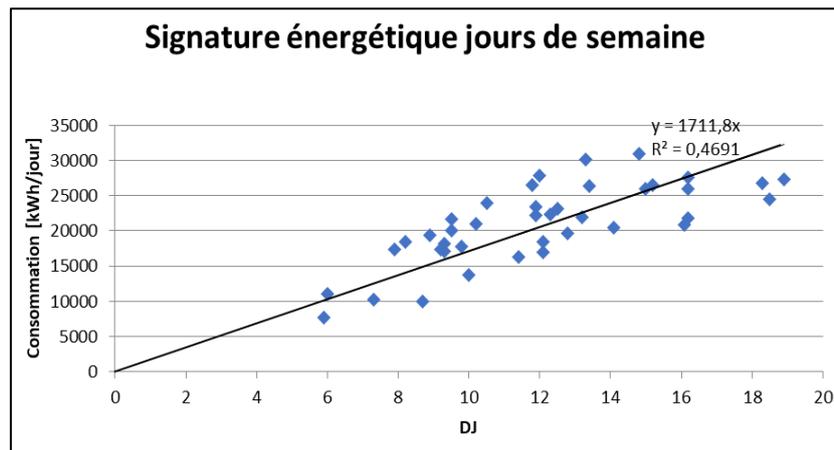


Figure 2 : Signature énergétique jours de semaine

Pour établir cette signature énergétique, nous sommes partis de données de consommation journalière de gaz sur une période de 4 mois. La droite de régression linéaire

est celle qui passe au mieux au milieu des différents points. On remarque sans grand étonnement que plus il fait froid, c'est-à-dire plus la valeur des degrés-jours est importante, plus la consommation des bâtiments augmente. On remarque que la droite passe par le point (0,0) car dans l'établissement le système de production de chaleur est uniquement dédié au chauffage. La production d'eau chaude pour d'autres consommations comme l'eau chaude sanitaire est réalisée autrement. Dans ce cas, en été, lorsque la température extérieure est suffisante, l'installation de chauffage est complètement à l'arrêt.

Signature énergétique propre aux jours de week-end

Durant le week-end la situation est différente. Nous avons vu que les bâtiments étaient légèrement chauffés afin de maintenir une température minimale à l'intérieur de ceux-ci. Ceci est évidemment vrai que lorsque la température extérieure est trop basse, autrement l'installation de chauffage est complètement à l'arrêt.

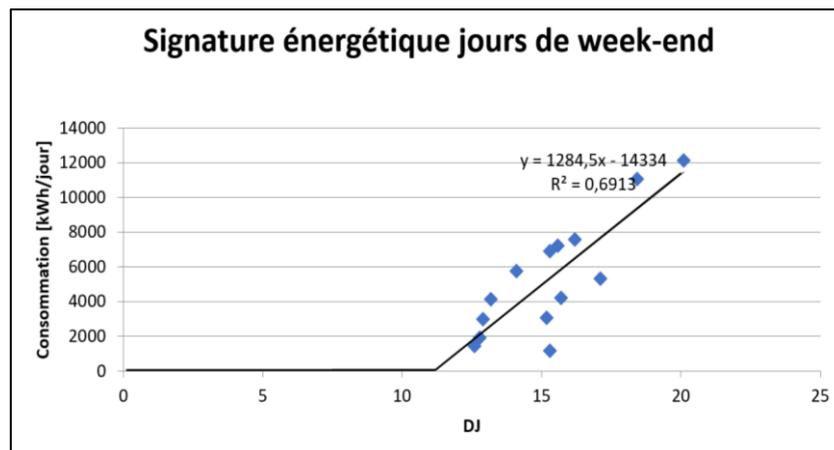


Figure 3 : Signature énergétique jours de week-end

La signature énergétique représentée ici, qui a été dessinée de la même manière que la précédente, nous prouve bien qu'au-dessus d'une certaine température le système de chauffe est à l'arrêt vu que la consommation y est nulle. On voit que la droite intercepte l'axe des x aux alentours de 11 DJ ce qui signifie que les locaux sont chauffés le week-end lorsqu'il fait moins de 7°C dehors.

2.4. La consommation annuelle

L'établissement de ces deux signatures énergétiques a permis de déterminer la consommation thermique annuelle. A partir des équations des deux droites de régressions, les consommations journalières ont été calculées en fonction des degrés-jours qui se rapporte à chaque jour de l'année. Ensuite l'addition de toutes ces valeurs journalières a permis de déterminer la consommation annuelle, qui équivaut en moyenne à 3740 MWh/an.

2.5. La monotone de chaleur

Le deuxième outil graphique réalisé est la monotone de chaleur qui représente la répartition des appels de puissance sur une année. Ce graphe représente le nombre d'heures durant lesquelles la puissance thermique est appelée durant l'année et ce pour chaque puissance comprise entre un arrêt du chauffage et la puissance thermique maximale. Afin que le graphique ait un degré de précision assez élevé, il a été construit à partir de données de consommation quart d'heure par quart d'heure.

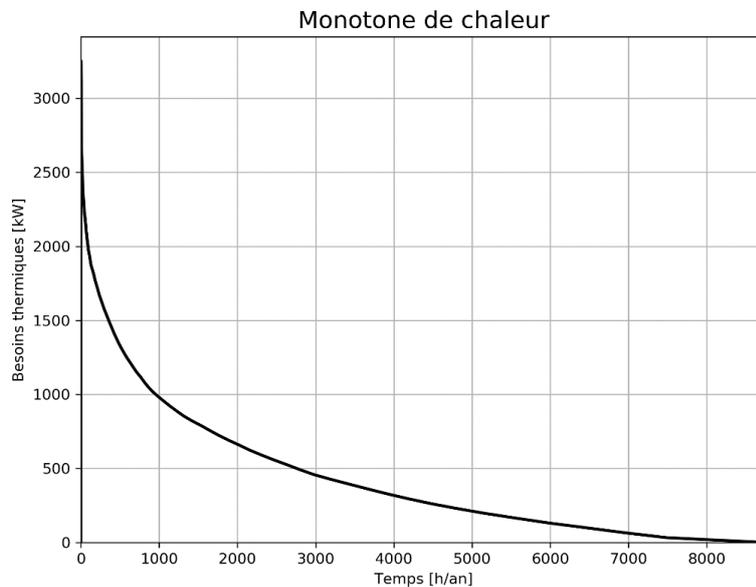


Figure 4 : Monotone de chaleur

La monotone permet de visualiser la proportion du temps durant laquelle la consommation est supérieure à un certain niveau de puissance. Par exemple : la consommation est supérieure à 500 kW durant 2 900 heures sur l'année, c'est-à-dire environ 120 jours. La surface sous la courbe représente les besoins de chaleur de l'établisse-

ment. Au sein du réseau de chaleur du centre 1 du campus Solvay la puissance appelée en été est très faible, c'est pourquoi le talon de la courbe se situe proche du zéro. Finalement, on remarque que le point culminant de cette courbe représente la puissance maximale qui peut être appelée. Elle se situe aux alentours de 3200 kW.

Ce graphique est nécessaire au dimensionnement d'une cogénération car il intervient dans le choix de la puissance de l'unité de cogénération. L'objectif du dimensionnement d'un système de cogénération est de maximiser la production d'énergie thermique. En d'autres termes, l'optimum énergétique de la cogénération est matérialisé par la plus grande surface sous la monotone de chaleur. On remarque qu'une faible puissance fonctionnera longtemps et de façon continue, alors qu'une grande puissance fonctionnera moins longtemps et de façon plus discontinue.

3. Dimensionnement de la cogénération

Le besoin thermique étant défini et analysé, le dimensionnement de la cogénération à proprement parler peut avoir lieu. Celui-ci a été effectué à l'aide de 2 logiciels différents dont les solutions obtenues vont être présentées ci-après.

3.1. Dimensionnement à l'aide du logiciel de la Région Wallonne COGENsim

Principe

Le premier logiciel de dimensionnement utilisé est COGENsim (« COGENsim 3.11 - Dec 2011.xls »). Il a été développé par la région wallonne et est régulièrement utilisé par les entreprises qui veulent installer une cogénération. Il s'agit d'un logiciel de simulation pour le calcul du dimensionnement et de la rentabilité d'une installation de cogénération.

Comme pour tout logiciel de simulation, plus les données de base encodées seront proches de la réalité, plus les résultats de la simulation seront fiables. La première étape a donc consisté en l'encodage des profils de consommation d'électricité et de besoins en chaleur pour chaque quart d'heure d'une année entière. Ensuite certaines données technico-économiques comme le prix des énergies, le choix de la technologie de cogénération, le prix de vente des CV, etc. ont été introduites.

L'optimisation consiste à simuler le fonctionnement "en temps réel" de plusieurs tailles d'unités de cogénération. Le dimensionnement optimum cherche à définir les puissances thermiques et électriques les mieux adaptées aux caractéristiques du projet. L'utilisateur peut choisir le type de dimensionnement souhaité. Soit COGENsim

affiche la cogénération qui maximise le nombre de certificats verts, soit celle qui maximise la Valeur Actualisée Nette (VAN), soit celle qui minimise le temps de retour. C'est cette dernière option qui a été choisie pour le projet car il s'agit du souhait du client.

Résultat

Selon le logiciel, la cogénération la plus intéressante qui minimise le temps de retour sur investissement possède une puissance électrique de 152 kW et une puissance thermique de 233 kW.

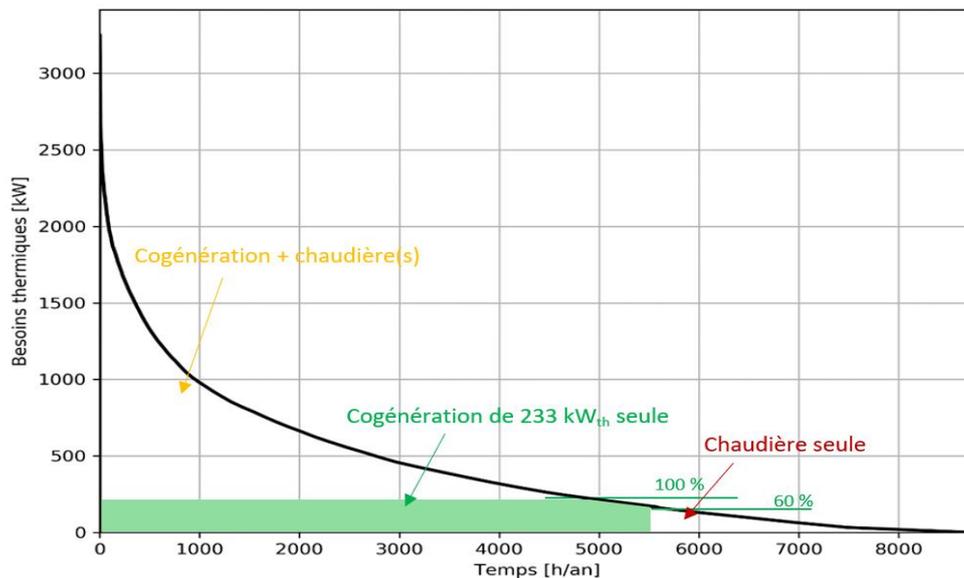


Figure 5 : Caractéristiques de l'optimum

Cette solution technologique peut être représentée sur la monotone de chaleur ci-dessus (figure 5). Le rectangle grisé illustre le fonctionnement de la cogénération de 233 kW thermique. On remarque que celle-ci pourra fonctionner durant 5717 heures par an et peut fonctionner jusqu'à 60% de sa charge maximale. Lorsque les besoins thermiques sont élevés, les chaudières fonctionneront en même temps que la cogénération comme représenté sur la partie gauche de la figure. En revanche lorsque les besoins thermiques sont trop faibles, la cogénération sera à l'arrêt et une chaudière apportera la chaleur nécessaire.

3.2. Dimensionnement à l'aide du logiciel développé par l'Université de Liège

Principe

Un second dimensionnement a été réalisé à l'aide d'un logiciel développé par l'Université de Liège. Celui-ci a été conçu spécifiquement pour le dimensionnement de la cogénération qui a été installée dans leurs établissements mais a été modifié et adapté à l'établissement concerné dans cette étude.

Après encodage de certains paramètres, le logiciel détermine l'optimum qui minimise le coût total du système.

Résultat

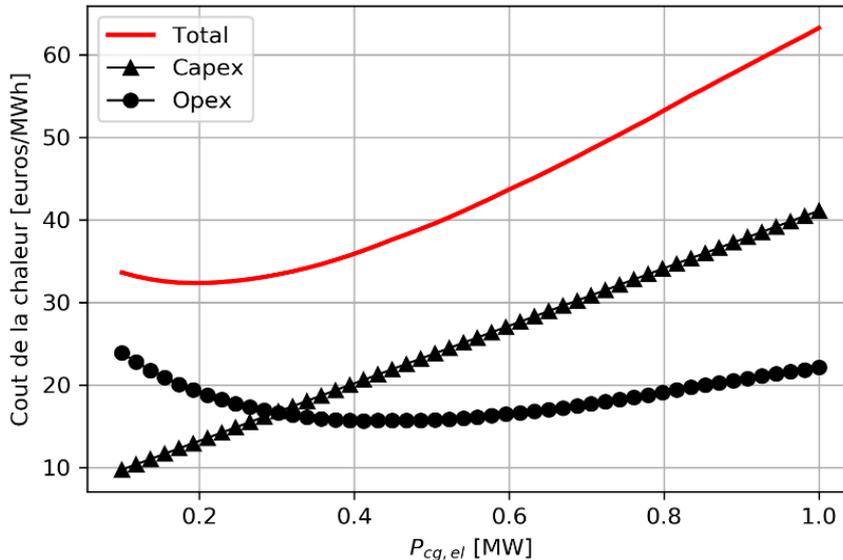


Figure 6 : Étude de coût en fonction de la puissance électrique

Le programme génère le graphique représenté à la figure 6. Il représente le coût de la chaleur en euros / MWh en fonction de la puissance électrique.

Les deux courbes inférieures représentent les différents coûts. L'une schématise les capex qui sont l'image des dépenses d'investissement tandis que la seconde représente les opex qui sont les dépenses d'exploitation. Finalement la courbe en trait continu représente le total de ces différents coûts et montre que l'optimum minimisant le coût total se situe aux environs de 200 kW électrique. On remarque par ailleurs que la courbe est relativement plate à ce niveau, ce qui signifie que la cogénération choisie peut se trouver dans un intervalle de puissance autour de ces 200 kW électriques. Cependant si cette puissance est trop grande, l'installation ne sera pas

rentable vu que les coûts seront plus élevés par rapport au scénario où aucune cogénération ne serait installée (puissance électrique équivalant à 0).

Ce second logiciel préconise donc d'installer une cogénération de 200 kW électrique et 340 kW thermique pour minimiser le coût total du système. Celle-ci fonctionnerait durant 4427 heures par an, dont 3900 heures en pleine charge.

3.3. La cogénération sélectionnée

Les deux solutions trouvées ne sont certes pas identiques étant donné que la fonction objective des optimisations diffère, mais sont relativement proches l'une de l'autre. Ces dimensionnements ont pour but de connaître approximativement la puissance que doit posséder l'unité de cogénération. Lors de l'appel d'offre, la gamme de tailles des machines a été élargie autour des tailles estimées les plus rentables. L'optimum énergétique final ne peut être déterminé qu'à partir de valeurs technico-économiques spécifiques et garanties par des fournisseurs.

L'unité sélectionnée est de marque Viessmann et possède une puissance électrique de 140 kW avec un rendement de 36,1 % et une puissance thermique de 207 kW et un rendement de 53,9%

4. L'impact de la cogénération sélectionnée

La machine étant choisie auprès d'un fournisseur, les impacts énergétique, économique et environnemental peuvent être définis avec certitude.

4.1. Le bilan énergétique

L'unité de cogénération de 207 kh_{therm} et 140 kW_{elec} proposée produira une partie des besoins thermiques et électriques qui sont actuellement assurés par des chaudières et par le réseau. Les besoins thermiques ont été déterminés à partir de l'index données des années antérieures. Le tableau ci-dessous synthétise le bilan énergétique annuel de la cogénération qui fonctionnera durant 5727 heures sur l'année.

Bilan énergétique

Situation avant cogénération	
Consommation de combustible (gaz naturel)	4380 MW _{combustible} /an
Besoins thermiques nets	3740 MWh _{therm} /an
Consommation d'électricité	3334 MWh _{élec} /an
Situation après cogénération	
Temps de fonctionnement de la cogénération	5727 heures/an
Énergie primaire consommée par la cogénération	2151 MW _{combustible} /an
Chaleur produite par la cogénération	1164 MWh _{therm} /an
Chaleur encore à produire par la chaufferie	2576 MWh _{therm} /an
Production d'électricité par la cogénération	765,4 MWh _{élec} /an

La machine permettra dès lors de produire 31,1 % du besoin en chaleur et environ 22,9 % de l'électricité.

4.2. Le bilan économique

Les caractéristiques technico-économiques étant connues, le bilan économique peut être réalisé. Le fonctionnement de la cogénération engendrera divers gains et dépenses qui sont représentés sur le graphique ci-dessous :

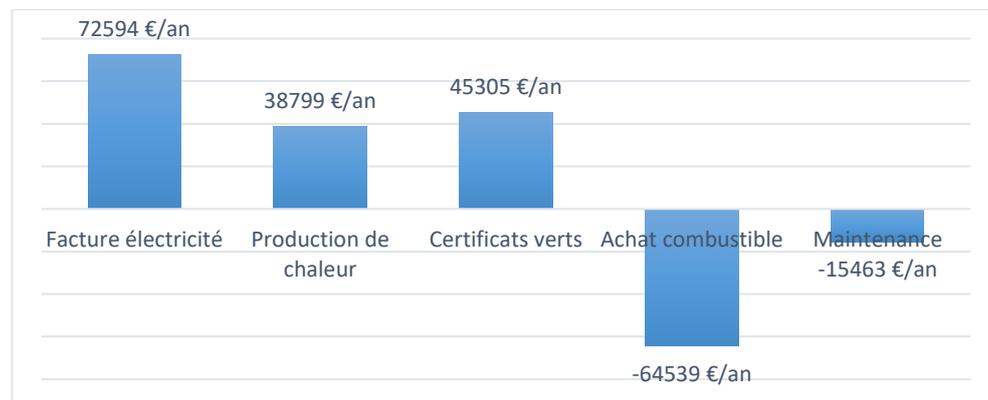


Figure 7 : Bilan économique

Vu qu'une partie de l'électricité sera produite en interne, il faudra en acheter moins sur le réseau et donc effectuer un gain sur la facture d'électricité. Le prix de l'électricité considéré est de 90,83 €/MWh. De même la chaleur produite par la cogénération ne sera plus à produire par les chaudières et donc un gain sur la facture d'achat de combustible sera aussi effectué, en considérant que le prix du combustible est de 30 €/MWh_{prim}. Finalement la vente des certificats verts octroyé par l'IBGE apportera encore un gain non négligeable, vu que le prix octroyé est d'environ 85 € par certificat.

Évidemment des dépenses sont aussi associées au fonctionnement de la cogénération. D'abord le gaz naturel doit être acheté et finalement la maintenance et l'entretien engendreront des frais supplémentaires.

La différence entre les gains et les dépenses permet d'estimer le gain annuel à plus de 76686 €/an ce qui est relativement élevé puisque ceci correspond à environ 42 % de l'investissement estimé à un peu plus de 180 k€.

Concernant la rentabilité, le temps de retour sur investissement (RSI) est calculé ci-dessous :

$$RSI = \frac{\text{Investissement}}{\text{Gain d'exploitation annuel}} = \frac{180366 \text{ €}}{76686 \text{ €/an}} = 2,4 \text{ années}$$

Finalement la valeur actualisée nette, qui représente la différence entre les gains et les dépenses en tenant compte de l'évolution des prix, est estimée à 426264 € sur une période de 10 ans.

4.3. Le bilan environnemental

Le dernier impact de la cogénération passé en revue est le bilan environnemental.

Grâce à son rendement de transformation relativement élevé, la cogénération utilise moins de combustible pour produire une même quantité d'électricité et de chaleur que des filières traditionnelles.

Si la chaleur et l'électricité était produite par des filières classique que sont une chaudière pour la production d'eau chaude et une centrale TGV pour l'électricité, la quantité de combustible consommée serait plus importante. Dans ce cas-ci, l'économie en énergie primaire est supérieure à 533 MWh/an.

Cette économie permet d'éviter de rejeter dans l'atmosphère une grande quantité de CO₂ qui permet de gagner de l'argent vu que 533 CV/an pourront être octroyés.

5. Conclusion

Le principe de la cogénération est de produire de l'électricité et de la chaleur, de façon combinée, à partir d'un seul combustible. Cette solution énergétique permet de valoriser la chaleur générée lors de la production d'électricité.

La détermination du besoin thermique est une étape primordiale pour effectuer une intégration énergétique correcte au sein d'un établissement. Les données des bâtiments ont été analysées afin de déterminer la monotone de chaleur propre à l'établissement. Ensuite, le dimensionnement à proprement parler, a pu être effectué à l'aide de différents logiciels, et a permis de connaître la taille que doit avoir la cogénération pour rentabiliser au mieux la machine.

Cette étude a finalement permis de sélectionner une cogénération ayant des puissances thermique et électrique de respectivement 207 kW thermique et 140 kW électrique. L'étude de la rentabilité du projet a montré que le temps de retour sur investissement de l'installation est de 2,4 années. Cette valeur est tout à fait acceptable pour un projet de la sorte. Cette machine sera installée prochainement au sein du réseau de chaleur.

6. Sources

- [1] BOIDELLAL M., *Cogénération et micro-cogénération, solutions pour améliorer l'efficacité énergétique*, Paris, Dunod, 2013, 320 p.
- [2] RECKNAGEL H., SPRENGER E., SCHRAMEK E.-R., *Génie climatique*, Dunod, 2007, 2000 p.
- [3] ZELLNER S. & BURGTOF J., *Cogeneration and trigeneration, how to produce energy efficiently*
Adresse URL : <https://www.giz.de/fachexpertise/downloads/2016-en-energy-cogeneration-trigeneration-guide.pdf>
- [4] BRUXELLES ENVIRONNEMENT IBGE DEPARTEMENT, (consulté en février 2018), *Réaliser une étude de faisabilité d'une cogénération dans les règles de l'art*.
Adresse URL : https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/cdcfaisabilite_cogen_juillet_2009_fr.pdf

- [5] KRARTI M., *Energy audit of building systems an engineering approach*, 2^e ad. CRC Press, 2011, 454 p.
- [6] ENERGIEPLUS-LESITE, (consulté en avril 2018), *La cogénération*
Adresse URL : www.energieplus-lesite.be/index.php?id=19143