



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des
transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et Cleantech

Rapport intermédiaire du 18-12-2023

OptiCADSol

Comparaison et optimisation des chaufferies
pour des chauffages à distance solaire



Date: 18.12.2023

Lieu: Yverdon-les-Bains

Prestataire de subventions:
Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Bénéficiaires de la subvention :
HEIG-VD
Institut des énergies (IE)
Route de Cheseaux 1, CH-1401 Yverdon-les-Bains
heig-vd.ch/rad/instituts/ie

Auteur(s):
Xavier Jobard, HEIG-VD IE, xavier.jobard@heig-vd.ch
Marc-André Baillifard, HEIG-VD IE, marc-andre.baillifard@heig-vd.ch
Quentin Francois, HEIG-VD IE (anciennement)

Suivi du projet à l'OFEN:
Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Stephan Mathez, stephan.a.mathez@solarcampus.ch

Numéro du contrat de l'OFEN: SI/502569-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Zusammenfassung

Wie bereits in früheren Projekten gezeigt wurde, lässt sich durch die Kopplung einer solarthermischen Anlage mit einem Biomassekessel in einem Fernwärmenetz der Holzverbrauch erheblich reduzieren. Ziel dieses Projekts ist es, Auslegungsregeln sowie Hydraulik- und Regelungsschemata zu erstellen, die es ermöglichen, die Kopplung von Solar- und Holzanlagen ohne negative Auswirkungen auf den Betrieb der Holzfeuerungsanlage (Anstieg der Schadstoffemissionen, Verringerung des Wirkungsgrads usw.) und auf die Rentabilität des Fernwärmenetzes zu realisieren. Diese Dimensionierungsregeln werden den Planern helfen, ihre Anlagen optimal zu dimensionieren. Schließlich wird eine vergleichende Studie durchgeführt, um eine solarthermische Lösung mit einer photovoltaischen Lösung in Kombination mit einer Wärmepumpe zu vergleichen.

Résumé

Comme cela a déjà été montré dans des projets précédents, le couplage d'une installation solaire thermique avec une production de chaleur à bois sur un réseau de chauffage à distance (CAD) permet de réduire la consommation de bois de manière significative. Le but du projet est d'établir les règles de dimensionnement ainsi que les schémas hydrauliques et de régulation permettant de réaliser le couplage solaire/bois sans que le fonctionnement de l'installation à bois soit péjoré (hausse des émissions de polluants, baisse de rendement, etc.), et sans péjorer la rentabilité du CAD. Ces règles de dimensionnement et principes de régulation aideront les planificateurs à bien dimensionner leurs installations et à les opérer de manière optimale. Enfin une étude sera menée afin de comparer une solution solaire thermique avec une solution photovoltaïque combiné à une pompe à chaleur.

Summary

As it has already been shown in previous projects, the coupling of a solar thermal installation with a biomass boiler on a district heating network) allows to reduce the wood consumption significantly. The aim of the project is to establish sizing rules as well as hydraulic and control schemes allowing to realize the solar/wood coupling without any negative impact on the operation of the wood-fired installation (increase of pollutant emissions, decrease of efficiency, etc.), and without any negative impact on the profitability of the district heating network. These sizing rules and regulation principles will help planners to optimally size and operate their installations. Finally, a comparative study will be conducted to compare a solar thermal solution with a photovoltaic solution combined with a heat pump.



Table des matières

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	3
Table des matières	4
Liste des abréviations.....	5
1 Introduction.....	6
1.1 Contexte et arrière-plan.....	6
1.2 Justification du projet.....	6
1.3 Objectifs du projet.....	7
2 Procédure et méthode.....	7
3 Travaux effectués et résultats.....	8
3.1 Dimensionnement de la chaufferie de référence selon QM bois.....	8
3.1.1 Données de consommation du CAD pour le dimensionnement.....	8
3.1.2 Schéma de principe de l'installation de référence.....	12
3.1.3 Régulation de l'installation de référence.....	13
3.1.4 Cascade de chaudières.....	14
3.1.5 Régulation de l'état de charge de l'accumulateur.....	16
3.1.6 Régulation température de retour chaudière.....	17
3.2 Description du modèle de chaudières à bois.....	18
3.2.1 Validation du type 869 pour 2 chaudières en cascade.....	18
3.2.2 Emissions polluantes des chaudières.....	21
3.3 Modélisation des condenseurs de fumées.....	23
4 Évaluation des résultats obtenus.....	25
5 Suite de la procédure.....	26
6 Bibliographie.....	27
7 Annexes.....	28
7.1 Annexe 1 : Liste des paramètres des combustibles et chaudières à bois.....	28



Liste des abréviations

Acronyme, sigle	Description	Unité
CàD ou CAD	Chauffage à distance.	-
CO ₂	Dioxyde de carbone	%
CO	Monoxyde de carbone	
COV	Composés Organiques Volatils	%
cvRMSE	Coefficient de variation de la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) :	%
ECS	Eau chaude sanitaire	-
NO _x	Oxyde d'azote	%
PCS ou GHV	Pouvoir calorifique supérieur	MJ/kg
PCI	Pouvoir calorifique inférieur	MJ/kg
PV	Photovoltaïque	-
QM Bois	Système de gestion de la qualité pour les chauffages au bois dans la production et la distribution de chaleur	-
Abréviation	Description	Unité
Boi	Boiler (Chaudière)	-
Con	Condenser (Condenseur)	-
fg	Flue gas (gaz de combustion ou de fumée)	-
Mfr ou Qm	Débit massique	kg/h



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan

La ressource en bois durable pour le chauffage bien que renouvelable est limitée en quantité. Actuellement en Suisse, les deux tiers de la ressource sont exploités [1]. Pour limiter les impacts environnementaux liés au transport, elle doit aussi être localement disponible. Il convient aussi de la sauvegarder pour des besoins nécessitant des niveaux de température supérieure (par exemple pour les procédés industriels), comme le prévoit les perspectives chaleur du canton de Vaud [2]. Dans ce rapport, il est prévu une réserve de 520 GWh de biomasse pour les procédés industriels contre 469 GWh pour les besoins de chaleur résidentiels.

Les concepts couplant le bois-énergie avec l'énergie solaire thermique représentent une excellente solution pour pallier le manque de ressource en bois, comme cela a été démontré dans le projet SolCAD [3]. En effet le solaire permet de couvrir les besoins en été et d'éteindre complètement les chaudières. Il est conclu dans cette étude qu'un potentiel de chaleur solaire non négligeable, entre 0.5 et 1 TWh, peut être produit pour les chauffages à distance (CAD) en Suisse. Ce potentiel serait doublé en prenant en compte l'augmentation du nombre de CAD à l'horizon 2050.

1.2 Justification du projet

Le couplage d'une installation solaire thermique avec des chaudières biomasse reste difficile en raison de mauvais rendement de combustion à charge partielle et d'une dynamique de modulation de la puissance des chaudières bois limitée. L'intégration d'une source intermittente de chaleur renouvelable à une chaudière biomasse permet de réduire sa charge et donc d'économiser du combustible. Cependant, cela a aussi pour conséquence d'augmenter le temps de fonctionnement à charge partielle de la chaudière biomasse. Cela peut réduire le rendement de conversion et surtout augmenter les émissions de polluants tel que les NOx et les particules fines. Aujourd'hui, aucune étude ne quantifie l'ampleur de cet effet. Face à ce problème, QM-bois préconise de découpler entièrement les producteurs d'énergie et leur stockage associé afin de garantir le fonctionnement optimal de la chaudière bois [4]. En revanche, le stockage de l'énergie solaire est primordial en été, réduit en intersaison et inexistant l'hiver. Une mutualisation des capacités de stockage semble prometteuse en termes d'optimisation d'investissement et de gain de place.

De plus, les PAC de grande puissance commencent à faire leur apparition pour décarboner efficacement les CAD avec les exemples du CAD Laurana [5] et des Vergers [6]. Couplé à une installation photovoltaïque, ce concept permettrait de fournir le même service qu'une installation solaire thermique avec une implémentation bivalente avec la chaudière bois. Ou bien, il pourrait fournir la totalité de la chaleur avec une implémentation monovalente et une connexion au réseau d'électricité. En revanche, il n'est pas établi qu'ils soient plus avantageux d'un point de vue économique et environnemental.



1.3 Objectifs du projet

Les objectifs du projet OptiCADSol ont été défini comme suit :

- 1) Quantification et réduction des émissions des chaudières à charge partielle et durant les phases transitoires
- 2) Estimation du potentiel de sauvegarde de la ressource bois à l'échelle Suisse avec la pénétration des technologies solaires (thermique et PV+PAC) dans les CAD
- 3) Potentiel de la mutualisation des stockages de chaleur entre producteurs de chaleur afin de réduire les coûts

Ces objectifs peuvent être atteints à travers la modélisation des systèmes mis en œuvre sur la base de cas d'étude. Des simulations dynamiques du fonctionnement de ces installations permettront en effet d'optimiser les concepts d'intégration tant sur le plan hydraulique que sur la régulation des équipements et leur dimensionnement.

Dans le contexte et les objectifs présenté ci-dessus, le projet OptiCADSol propose de répondre aux questions de recherche suivantes dans le domaine des CAD :

- Quel est le potentiel d'économie de combustible et de réduction des impacts environnementaux qui peut être obtenu en combinant des chaudières bois et une installation solaire thermique ?
- Quel est le potentiel d'économie d'électricité importé du réseau électrique et le potentiel de réduction des impacts environnementaux en couplant une grande PAC utilisé dans un CAD avec un champs photovoltaïques ?
- Quels sont les bénéfices et contraintes en termes d'intégration et de dimensionnement des équipements (chaudières et stockage) lors d'un couplage d'une chaudière à bois avec une installation solaire thermique ?
- Est-ce que des situations économiques gagnant-gagnant peuvent être définies pour le couplage du solaire thermique et des chaudières bois, notamment au niveau du stockage de chaleur et des opérations de maintenance

2 Procédure et méthode

Afin d'atteindre les objectifs du projet et de répondre aux questions de recherche, le plan de travail est découpé en 5 volets de travail et un volet de management (WP0). Leur organisation est décrite dans la Figure 1. Premièrement, la problématique de la modélisation de la chaudière à plaquette et du condenseur de fumée sera abordé dans le WP1. Puis au WP2 des schémas hydrauliques du couplage des chaudières avec une installation solaire thermique et un stockage mutualisé seront développés ainsi que la régulation et les règles de dimensionnement. Le WP3 développera de la même thématique que le WP2, mais dans le cas de la combinaison photovoltaïque et pompe à chaleur. Ensuite, les modèles numériques seront combinés et paramétrés dans le WP4 afin d'estimer le potentiel de réduction des émissions, de la consommation de bois et des coûts pour un cas d'étude. Enfin au WP5, les résultats du projet seront disséminés à un large public du terrain et du monde académique.

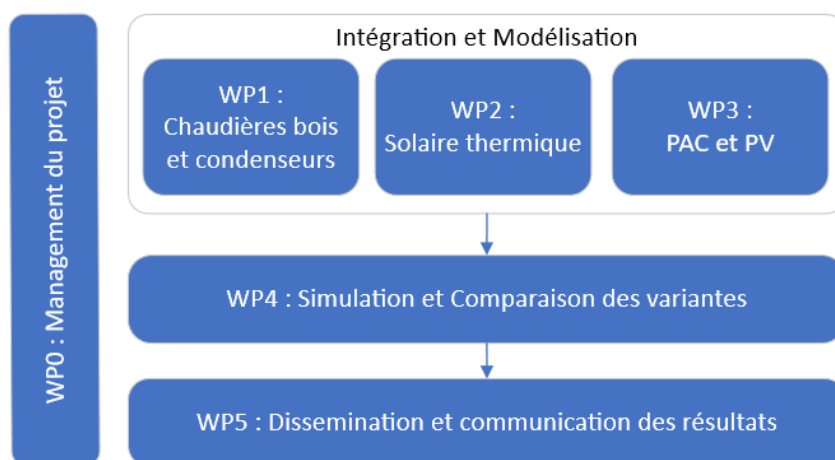


Figure 1 : Schéma bloc de l'organisation des volets de travail (WP)

3 Travaux effectués et résultats

3.1 Dimensionnement de la chaufferie de référence selon QM bois

3.1.1 Données de consommation du CAD pour le dimensionnement

Dans ce paragraphe, les caractéristiques principales du CAD retenu nécessaires au dimensionnement de la production de chaleur sont résumées. Le CAD retenu est situé aux Ponts-Martel. Celui-ci opéré par les Marais-Rouge, la société coopérative de chauffage à distance à bois. Les saisons de chauffage 2017-18 et 2018-19 ont été considérées ici, car ce sont les dernières pour lesquelles des données complètes étaient disponibles. La Figure 2 montre la consommation énergétique annuelle du CAD pour ces deux périodes, qui s'élève en moyenne à 5'830 MWh/an. Etant donné la longueur du tracé de conduite de 3800 mètres, la densité de raccordement pour ce CAD est de 1.53 MWh/m/an, ce qui en fait un CAD de faible densité de raccordement.

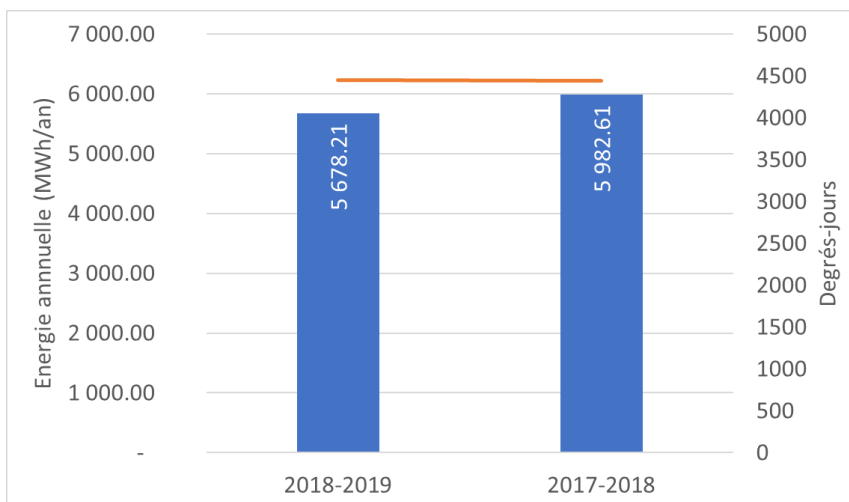


Figure 2: Production énergétique annuelle totale du CAD



Du fait que ce CAD est monitoré depuis plusieurs années, son fonctionnement a pu être optimisé. Cela peut se voir aux températures de retour du CAD (Figure 3), qui sont en moyenne à 40°C durant la période de chauffage, ce qui indique que tous les consommateurs du réseau sont correctement régulés.

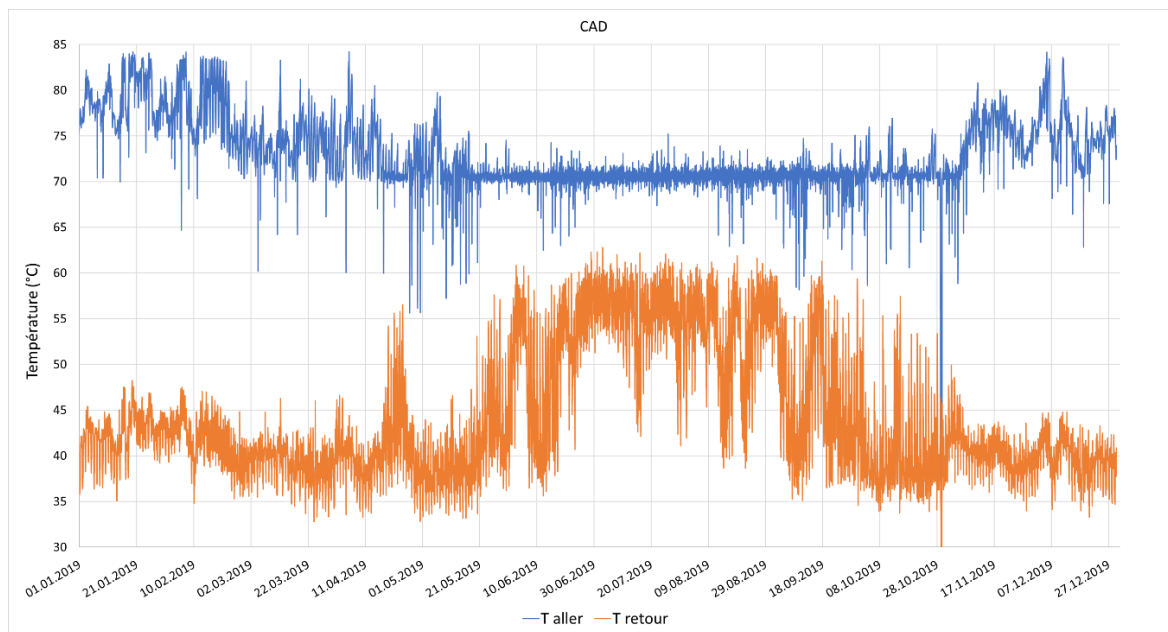


Figure 3: Température aller et retour du CAD

Etant donné la densité de raccordement et les températures du CAD, les pertes de chaleur du réseau peuvent être estimées à 10-15% de la chaleur produite par la centrale.

La Figure 4 montre la signature énergétique du réseau. On constate là aussi une signature énergétique relativement propre, ce qui indique une régulation qui fonctionne correctement.

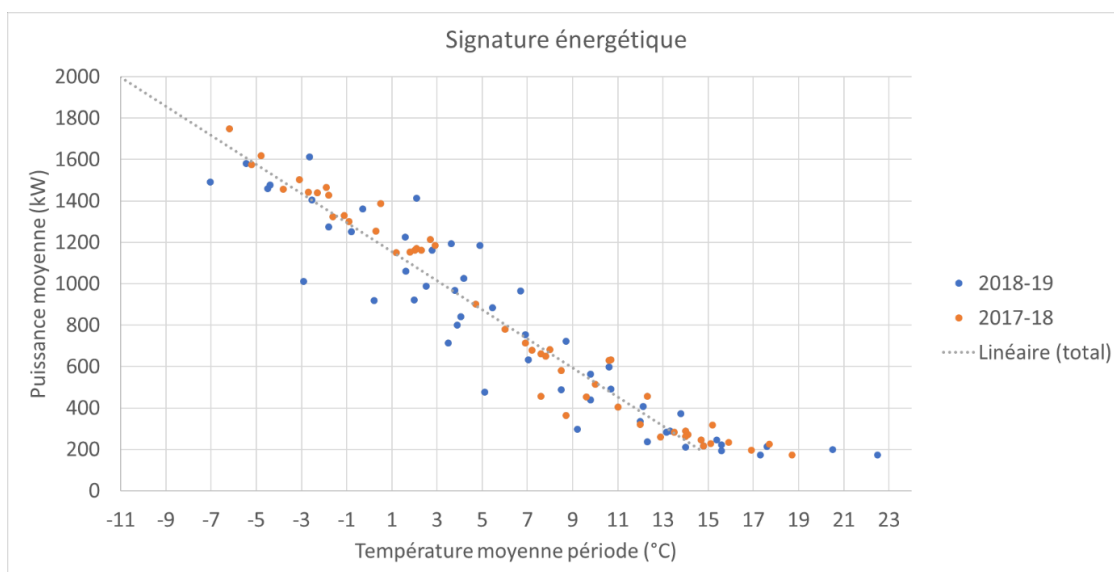


Figure 4 : Signature énergétique du CAD des Ponts-de-Martel pour les années de chauffe considérées 2017-18 et 2018-2019 réalisé avec les puissances moyennes journalières.



De cette signature énergétique on tire les éléments supplémentaires suivants :

- La puissance de pointe effectivement constatée est de ~1700 kW à -7°C ;
- La puissance de pointe consommée par le réseau à -11°C correspondrait à ~2 MW ;
- La température de non-chauffage est d'environ 14-15°C ;
- La puissance moyenne journalière nécessaire à la production d'ECS est de 203 kW

En considérant que les besoins de chaleur pour l'ECS sont constants tout au long de l'année, on peut donc estimer la consommation annuelle moyenne pour la production d'ECS à 1'780 MWh/an, ce qui correspond à 30% des besoins en énergie totaux du CAD.

La puissance instantanée nécessaire à la production d'ECS peut être approximée en considérant un nombre d'heures de fonctionnement de 4000 h/an pleine charge pour l'ECS. Cela permet d'estimer la puissance thermique maximale requise pour l'ECS à ~400 kW.

La Figure 5 montre la monotone de puissance chaleur fournie au CAD pour l'année 2019, en kW, en moyenne journalière.

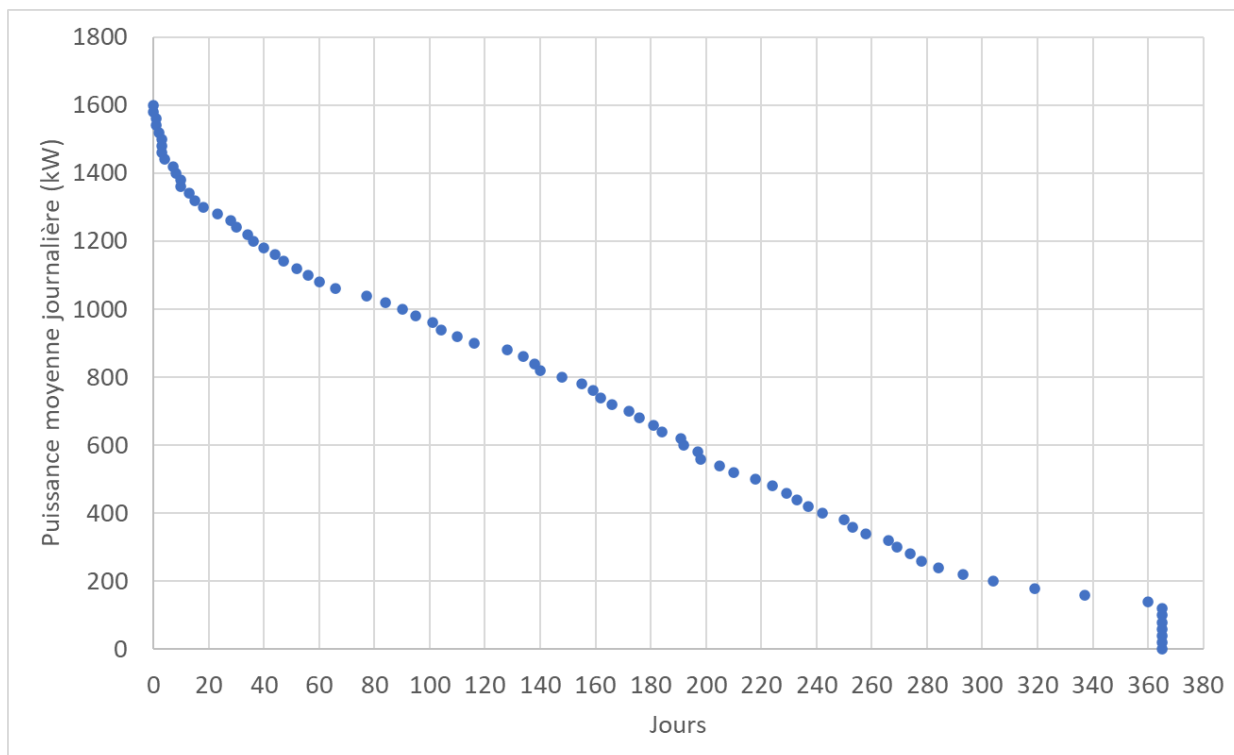


Figure 5: Monotone de chauffage pour le réseau CAD, valeurs moyennes journalières de 2019

A partir de toutes les données disponibles du CAD, il est possible de déterminer Les chiffres clés utilisés par la suite pour le dimensionnement de la production de chaleur. Ces chiffres sont résumés dans le tableau ci-dessous.



Tableau 1 : chiffres clés du réseau utilisés pour le dimensionnement selon QM bois

Grandeur	Valeur retenue
Production totale de chaleur (MWh/an)	5'830 MWh/an
Part de la production de chaleur dédiée à l'ECS	30%
Puissance de pointe chauffage @-11°C	1.6 MW
Puissance de pointe prod. D'ECS	400 kW
Température de non-chauffage	14°C
Pertes de chaleur du réseau (%)	10%

Ces valeurs seront utilisées par la suite afin de dimensionner la production de chaleur selon le guide QM bois [4].

Le dimensionnement de la production de chaleur est réalisé à l'aide du fichier Excel mis à disposition par QM bois ainsi que des chiffres clés résumés dans le Tableau 1. La station météo considérée est celle de La Chaux-de-Fonds. A partir des données introduites dans le fichier Excel, une monotone de chauffage est obtenue (Figure 6). Celle-ci peut être comparée avec celle de la Figure 5. Pour faciliter la comparaison, la monotone de chauffage de la Figure 5 a été superposée à celle provenant du fichier Excel QM bois. La correspondance entre les deux monotones est satisfaisante, ce qui confirme les données retenues pour le dimensionnement.

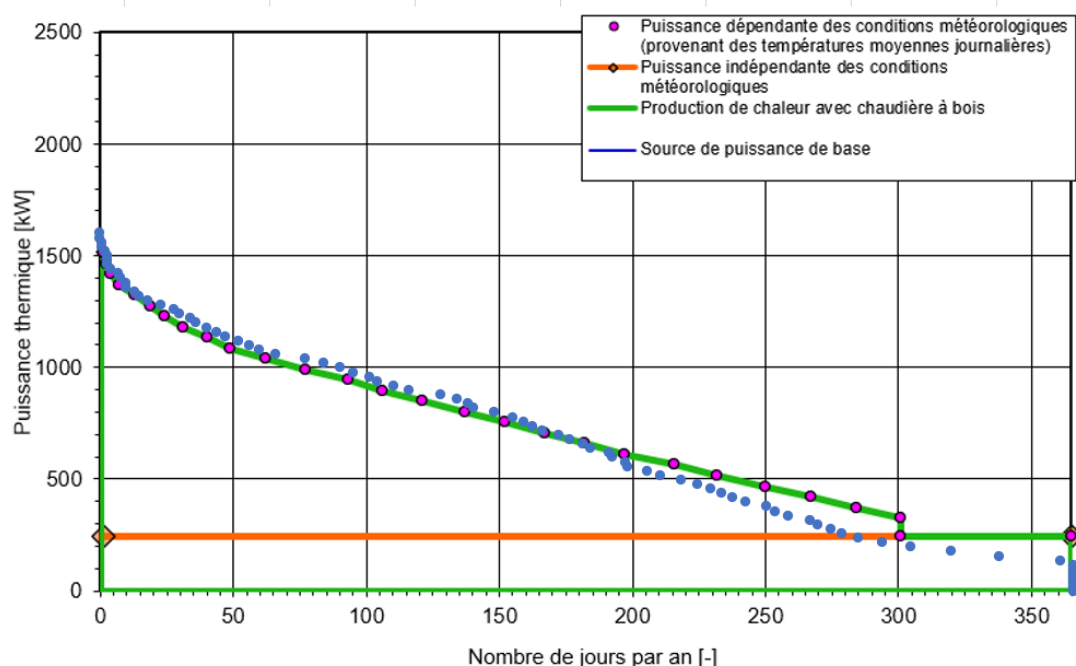


Figure 6 : Superposition des Monotones de chauffage issu du fichier Excel de QM bois avec celui du CAD des Ponts-de-Martel de 2018-2019 (Figure 5)



De cette monotone, on ressort les contraintes suivantes concernant la production de chaleur :

- Puissance journalière moyenne maximale de la production de chaleur : 1513 kW
- Puissance journalière moyenne minimale de la production de chaleur : 246 kW

Pour répondre à ces contraintes avec une installation fonctionnant uniquement avec du bois, une solution standard du type WE6 selon QM bois est proposée. Cette solution consiste à installer deux chaudières à bois en parallèle avec un accumulateur de chaleur. Il est proposé d'alimenter ces chaudières avec des plaquettes de bois de qualité M35 (contenu en eau inférieur à 35%) et d'opter pour des chaudières à grille mobile. Les caractéristiques principales de la solution proposée sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : grandeurs caractéristiques chaufferie à bois selon QM bois

Caractéristique	Valeur
Combustible	Plaquettes forestières <M35
Puissance nominale chaudière à bois 1	600 kW
Puissance nominale chaudière à bois 2	1200 kW
Taille d'accumulateur installé	40 m ³

Avec ces valeurs, les critères fixés par le QM bois pour la production de chaleur sont tous respectés, comme cela peut être vu sur l'extrait du fichier Excel QB bois ci-dessous.

Données caractéristiques calculées		Résultat
Centrale de chauffage	Nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge (chaudière à bois) [h/a]	3 236
	Nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge (chaudière mazout/gaz) [h/a]	—
	Production annuelle de chaleur avec du bois [%]	100.0%
	Volume de l'accumulateur [m3]	40.0
	Cas de fonctionnement à faible charge [kW]	90.0
	Dimensionnement de la puissance de la chaudière à bois 1	32.5%
	Dimensionnement de la puissance de la chaudière à bois 2	65.0%
	Totalement	97.5%
	Dimensionnement de la puissance de la chaudière mazout/gaz [kW]	—
	Comparer les données de puissance avec données d'énergie (Figure ci-dessous liens dans Figures)	100.6%

Figure 7 : extrait du fichier Excel QM bois « situationserfassung_V37 » avec la solution proposée.

3.1.2 Schéma de principe de l'installation de référence

A partir des données présentées dans le Tableau 2, il est possible d'établir le schéma hydraulique de la chaufferie telle que préconisée selon la solution standard WE6 du QM bois (Figure 8).

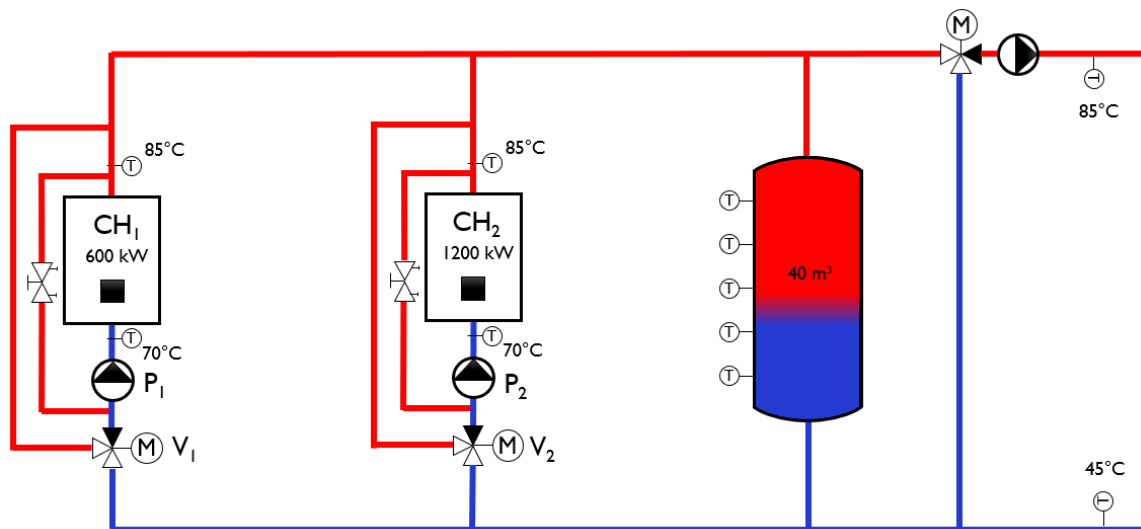


Figure 8 : schéma de principe solution standard QM bois

3.1.3 Régulation de l'installation de référence

La régulation de la centrale de chauffe de référence est réalisée conformément aux exigences du QM bois. Deux niveaux de systèmes MCR (Mesure Commande & Régulation) sont implantés :

1. Le système MCR maître de la centrale, qui pilote les différents organes de la centrale et donne les consignes de puissance aux chaudières
2. Les systèmes MCR esclave des chaudières, qui règle les composants internes des chaudières.

La Figure 9 montre un extrait des différentes fonctions de régulation du MCR maître.

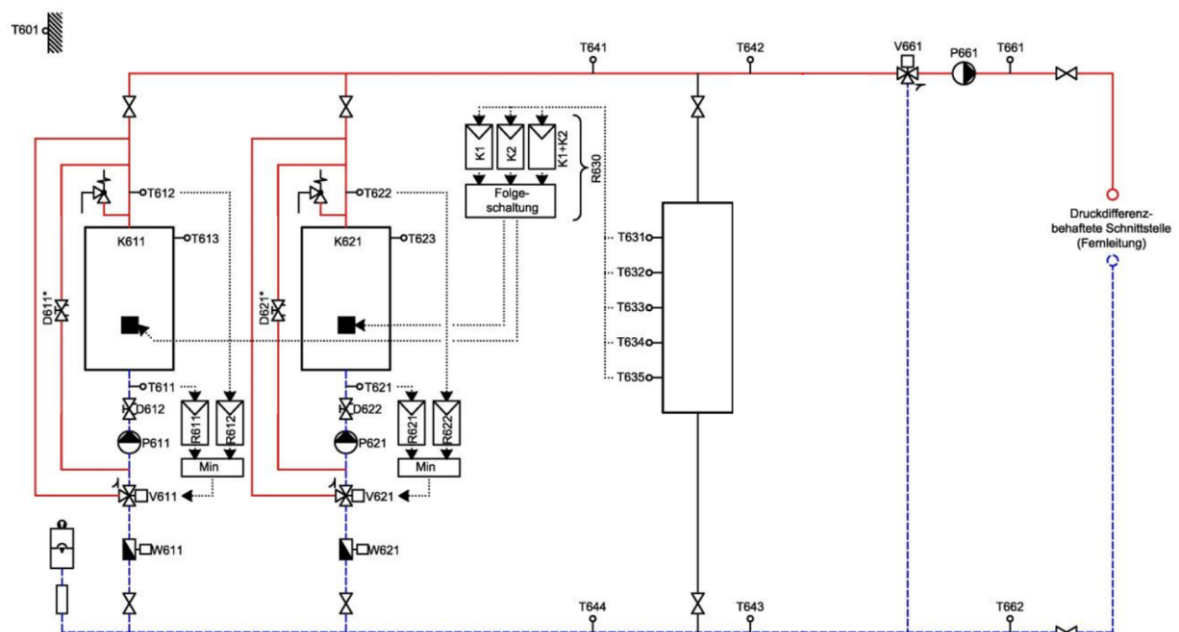


Figure 9: Extrait de QM-Holz : Kurzversion Standardschaltung WE6 : Monovalente Zweikessel-Holzheizungsanlage mit Speicher



Le fonctionnement du système MCR esclave va dépendre du fabricant de la chaudière. Les détails de fonctionnement de la régulation ne sont pas nécessaires, du moment que l'installation peut prendre comme entrée une consigne de puissance, et varier de manière continue la puissance de la chaudière entre 30% et 100% de la puissance nominale de la chaudière

Les fonctions principales du système MCR maître sont importantes pour le bon fonctionnement de l'installation. Les fonctions principales sont brièvement rappelées ci-dessous.

3.1.4 Cascade de chaudières

La cascade de chaudière suivante est proposée et présentée en Figure 10 :

- Lorsque les besoins en chaleur sont faibles (de 1 à 600 kW dans notre cas), seule la chaudière 1 est en fonction. Cela devrait être le cas jusqu'à une température moyenne journalière de l'ordre de 8°C
- Du moment que la chaudière 1 ne peut plus couvrir seule les besoins, la chaudière 2 est enclenchée manuellement et la chaudière 1 arrêtée. La chaudière 2 fonctionne seule jusqu'à ce qu'elle ne puisse plus couvrir les besoins, ce qui correspond à une température moyenne journalière de -5°C
- Du moment que la chaudière 2 ne peut plus couvrir seule les besoins de chaleur, les 2 chaudières sont mises en marche et fonctionnent en parallèle. Ce fonctionnement en parallèle est maintenu jusqu'à ce qu'il soit établi que la chaudière 2 seule peut à nouveau couvrir les besoins pour une période prolongée, ce qui pourrait être le cas lorsque la température moyenne journalière passe de manière prolongée au-dessus de ~2°C.
- Le passage du fonctionnement de la chaudière 2 à la chaudière 1 se fait quant à lui lorsque la température moyenne journalière passe de nouveau durablement au-dessus de 13°C.

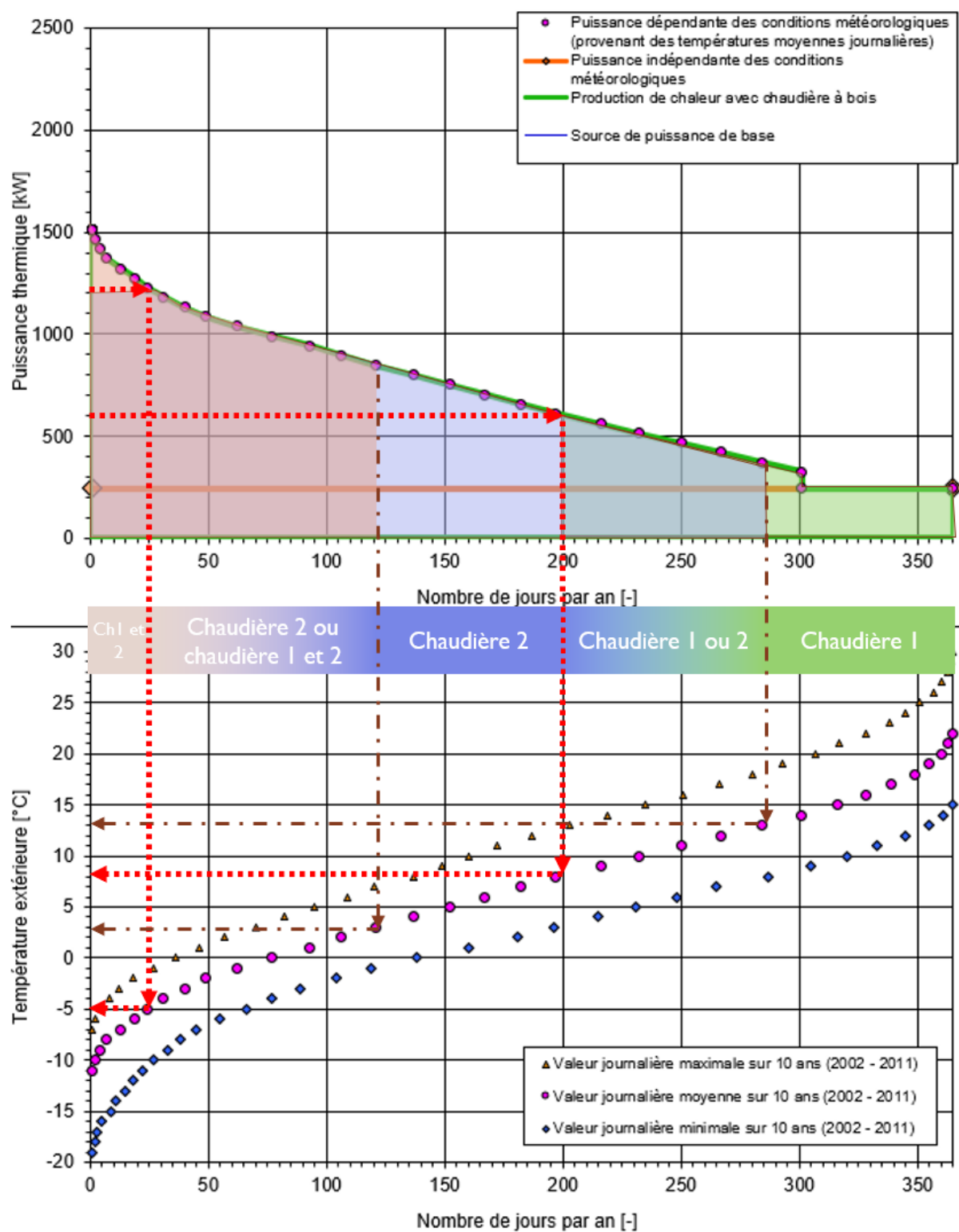


Figure 10: Enclenchement des différentes chaudières en fonction de la température extérieure



La Figure 11 suivante montre comment la commutation des chaudières se serait déroulée pour l'année 2019, basé sur les critères de température moyenne journalière définis précédemment.

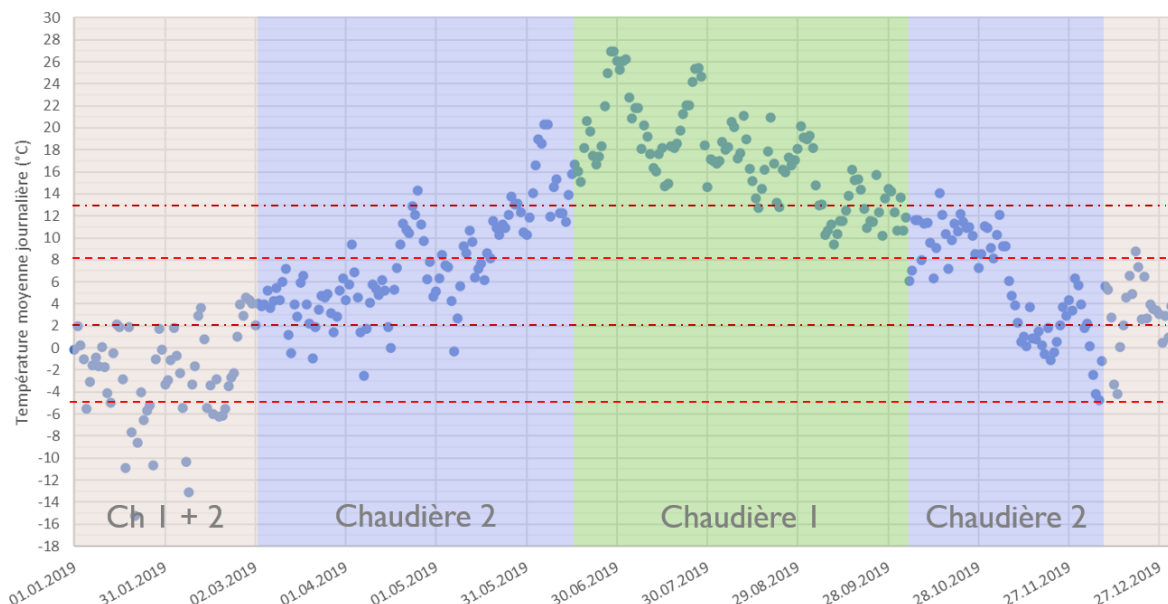


Figure 11: commutation des chaudières, exemple année 2019

Au sein des différents modes de fonctionnement de la cascade, la régulation de la puissance de chaque chaudière est basée sur l'état de charge de l'accumulateur, comme décrit ci-dessous.

3.1.5 Régulation de l'état de charge de l'accumulateur

L'état de charge est déterminé à l'aide d'au minimum 5 sondes de température réparties sur la hauteur de l'accumulateur de chaleur (T631 à T635 sur la Figure 9). L'accumulateur est ainsi divisé en 5 tranches, qui représentent chacune 20% de la charge totale de l'accumulateur.

On fixe 2 niveaux de température distincts : (1) le niveau de température « chargé », qui correspond à la température de consigne en sortie des chaudières (T612 et T622 sur la Figure 9), et (2) le niveau de température « vide », qui correspond à la température de retour maximale du réseau CAD (T662 ou T643 sur la Figure 9). L'accumulateur étant construit pour garantir une bonne stratification de température, le taux de charge total de l'accumulateur peut être déterminé à partir de la valeur des différentes sondes de température comme illustré sur la Figure 12 : Dès qu'une sonde de température de l'accumulateur a atteint le niveau de température « chargé » (fixé à 90°C sur l'exemple de la Figure 12), la tranche de l'accumulateur correspondante est considérée chargée. Lorsque la sonde de température de l'accumulateur est inférieure à la température « vide » (fixé à 60°C sur l'exemple de la Figure 12), la tranche de l'accumulateur correspondant est considérée vide. Lorsque la température d'une sonde est comprise entre la valeur « vide » et la valeur « chargé », le taux de charge de la tranche de l'accumulateur est interpolé de manière linéaire selon la valeur de la température. Cette méthode permet donc de calculer le taux de charge global de l'accumulateur, qui va donc varier entre 0 et 100%

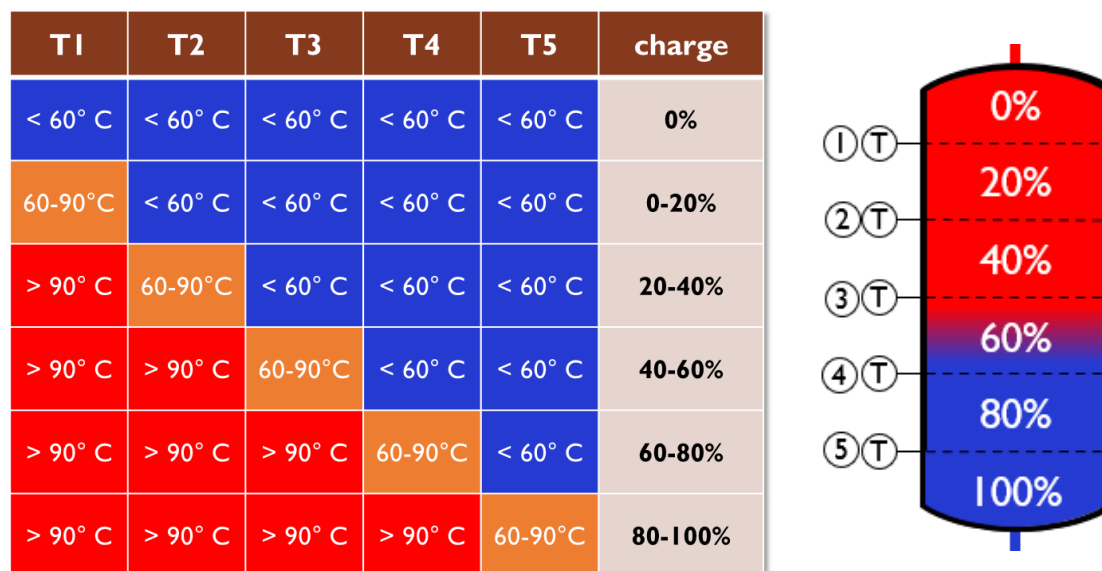


Figure 12 : exemple détermination du taux de charge

Le régulateur MCR maître va réguler les consignes de puissance des chaudières afin de maintenir un taux de charge de l'accumulateur d'environ 60%. Lorsque les deux chaudières fonctionnent en parallèle, elles reçoivent la même consigne de puissance relative (15 à 100%).

Lorsque la consigne de puissance d'une chaudière passe en dessous d'une valeur limite (typiquement 30% de la puissance nominale de la chaudière), l'accumulateur est rempli à 100% et ensuite la chaudière est mise à l'arrêt. La chaudière s'enclenche à nouveau lorsque le taux de charge de l'accumulateur est inférieur à 60%. La chaudière démarre à charge partielle, avant d'augmenter la puissance fournie si nécessaire.

3.1.6 Régulation température de retour chaudière

Les pompes des chaudières à bois fonctionnent à débit constant. De plus, chaque chaudière a une température de consigne de production de chaleur fixe (T612 et T622 sur la Figure 9). La seule manière de varier la puissance délivrée par les chaudières est donc de faire varier la température de retour des chaudières (T611 et T621 sur la Figure 9). Cela est réalisé par les vannes 3 voies (V621 et V611 sur la Figure 9), qui régulent de manière à garder la température de production fixe (T612 et T622 sur la Figure 9).

Les vannes 3 voies (V621 et V611 sur la Figure 9) sont aussi là pour s'assurer que la température de retour des chaudières ne passe jamais sous une température limite, typiquement 60°C.



3.2 Description du modèle de chaudières à bois

La description détaillée dans un modèle numérique du fonctionnement d'une chaudière à bois est une tâche complexe : en plus de la régulation, il faut pouvoir décrire en détail les processus de séchage, pyrolyse et gazéification qui ont lieu sur la grille et ensuite les processus de combustion des gaz de bois. Ce modèle doit ensuite pouvoir tenir compte des spécificités des différents constructeurs de chaudières, et même des spécificités entre les différents modèles de chaudières d'un même constructeur. Finalement, ce modèle doit aussi tenir compte du fait que sur des installations réelles, le choix des paramètres de réglage des différents organes est laissé à l'installateur, qui les définit selon son expérience. La complexité d'un tel modèle de chaudière serait tel qu'il serait difficilement implantable dans une simulation d'un réseau CAD, et que les résultats obtenus seraient nécessairement très spécifiques au type de chaudière utilisé comme modèle.

Afin d'obtenir des résultats peut être légèrement moins précis, mais nettement plus généraux, l'approche suivante a été retenue : Un modèle numérique de chaudière simple déjà développé sur TRNSYS, le modèle de Haller et al. [7], type 869 a été adapté et calibré avec le combustible du CAD des Marais-Rouge (voir paragraphe 3.2.1). Afin de pouvoir quantifier les émissions de polluants des chaudières bois, ce modèle numérique de chaudière a dû être adapté. Les adaptations sont décrites au paragraphe 3.2.2.

3.2.1 Validation du type 869 pour 2 chaudières en cascade

Dans un premier temps, afin de calibrer et valider les modèles des chaudières, les deux condenseurs n'ont pas été simulés. La production de chaleur de ces condenseurs a été fixée par un fichier texte contenant les données du monitoring. Cette stratégie a permis de d'abord valider les modèles numériques des chaudières. Une fois les chaudières validées, il ne restera plus qu'à calibrer et valider les véritables modèles de simulations des condenseurs. En d'autres termes, cette stratégie a permis de limiter le plus possible les erreurs et de produire une simulation qui soit la plus fidèle à la réalité.

1. Comparaison annuel consommation de bois monitoring/simulation

Pour le PCS et masse volumique du combustible choisis ([annexe 1](#)), nous obtenons une consommation de bois [m³] sensiblement identique entre simulation et monitoring.

Pour obtenir la consommation de bois, nous avons appliqué la formule suivante :

$$Q_{bois_{m3}} = \left(\frac{Q_{fuel_{kJph}}}{\rho_{fuel} * GHV_{fuel,dry}} \right) * dt \quad (1)$$

Avec $Q_{fuel_{kJph}}$ pouvoir calorifique moyen du combustible utilisé durant ce pas de temps [kJ/h], ρ_{fuel} la masse volumique du combustible [kg/m³] et $GHV_{fuel,dry}$ le pouvoir calorifique supérieur (PCS) du combustible sec [kJ/kg].

Pour les données du monitoring, la consommation de bois [m³] de chaque chaudière est répertoriée toutes les 2 semaines dans un fichier Excel.

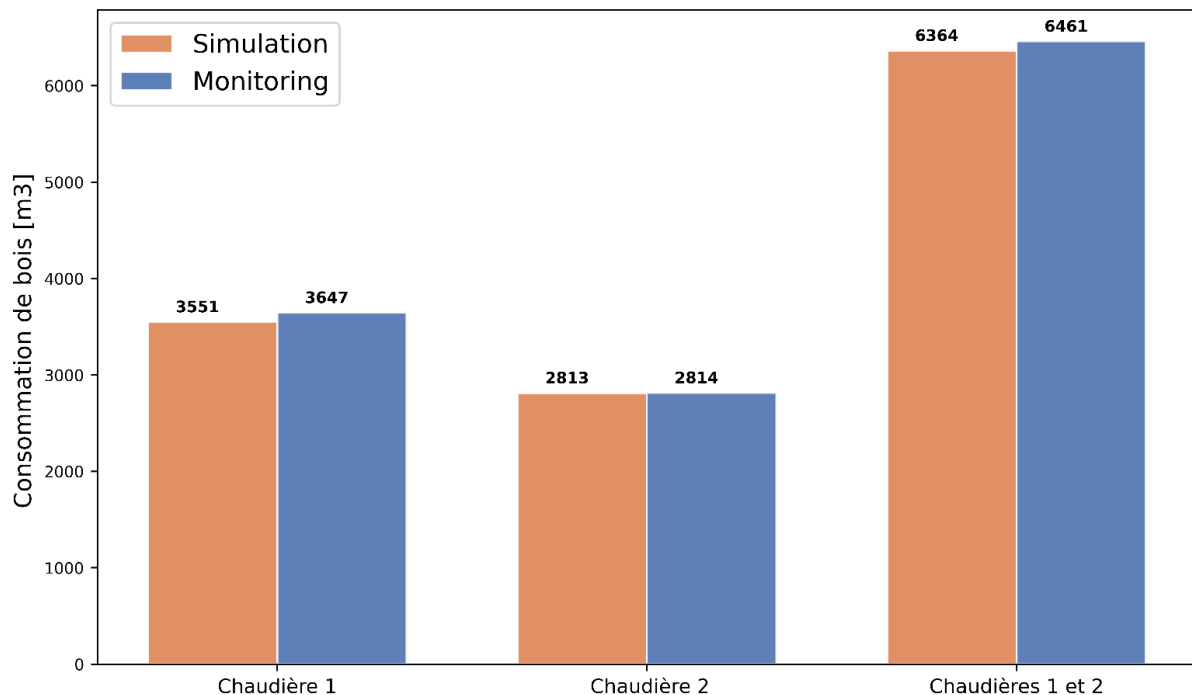


Figure 13 : Comparaison consommation de bois monitoring/simulation - 2019

Comme illustré par la Figure 13, la consommation de bois calculée par le modèle des chaudières est très proche de la consommation de bois mesurée. Avec une erreur relative de 1,5 % pour la somme des deux chaudières bois, nous pouvons considérer que la partie de la consommation de bois des chaudières concorde avec les données de monitoring, ce qui est essentiel pour la validation du modèle des chaudières. Cependant, il convient de souligner que la validation complète du modèle des chaudières nécessitera d'autres vérifications et analyses approfondies, et notamment la comparaison des monotones de puissance de chaque chaudière afin de valider que le modèle est bien capable de reproduire le comportement dynamique des chaudières et de la chaufferie.

2. Evaluation dynamique horaire des modèles

La modélisation de la chaufferie a été réalisée sur le logiciel TRNSYS. Les chaudières à bois sont modélisées avec le type 869 développé par (Haller et al., 2011). C'est un modèle numérique permettant de simuler toute sorte de chaudière de technologie et combustible différent, tel que le gaz naturel, le fioul ou les pellets de bois. Les paramètres sont définis à partir des données ci-dessus et des données fournies par le constructeur.

La validation des modèles a été effectuée en comparant les puissances en sortie (chaudière et condenseur) des données de monitoring avec les résultats de la simulation et en évaluant le cvRMSE associé (éq. 2).

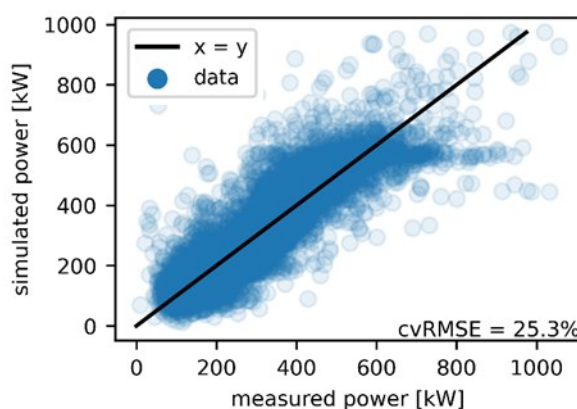
$$cvRMSE = \frac{\sqrt{\sum (y - \hat{y})^2}}{\bar{y}} \quad (2)$$

Avec : y les données du monitoring, $\hat{y}$ les données de simulation et $\bar{y}$ la moyenne des valeurs de monitoring.



La validation des simulations donne de bon résultats (voir Figure 14), avec des valeurs de cvRMSE pour les puissances de chaudières inférieures à 30 % (23.5% et 25.3 %). Le comportement dynamique des chaudières est fidèlement représenté en considération des données d'entrée et du bruit des mesures. Un écart d'environ 300 kW sur la Figure 15 et la Figure 16 est notable entre simulation et monitoring (à $x = 0$ [h]), qui finalement se compense avec les deux figures. Il s'agit du transitoire de démarrage des chaudières qui est plus importants dans la simulation que dans la réalité.

a) Chaudière 1



b) Chaudière 2

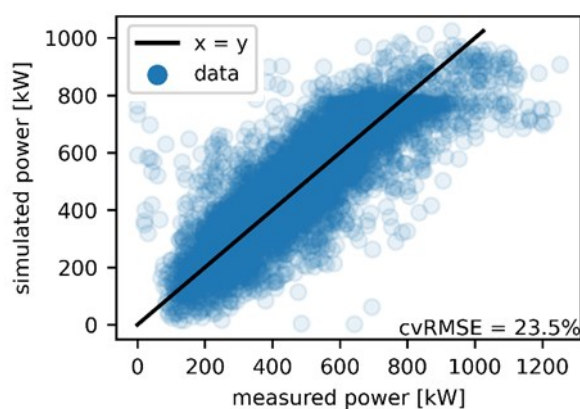


Figure 14: Comparaison des données de monitoring et des simulations pour la chaudière bois 1 (à gauche) et 2 (à droite)

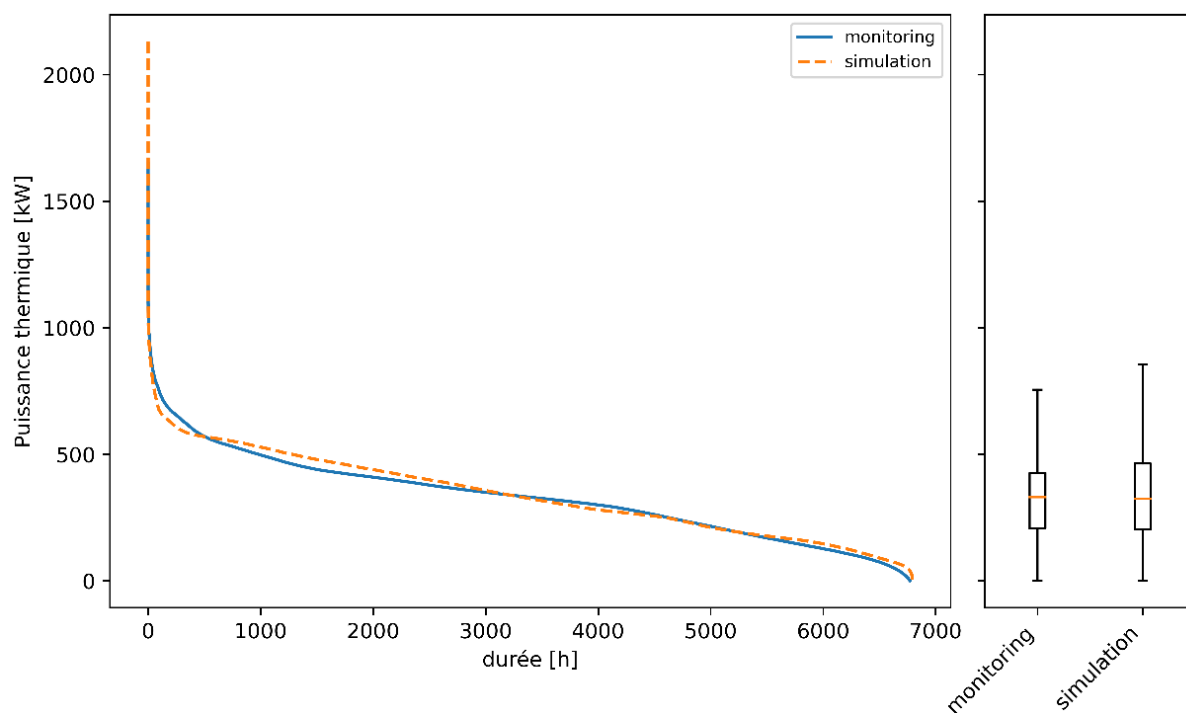


Figure 15 : Comparaison des monotones de puissance de la chaudière 1
issus du monitoring de la chaufferie du CAD des Marais-Rouge et des simulations

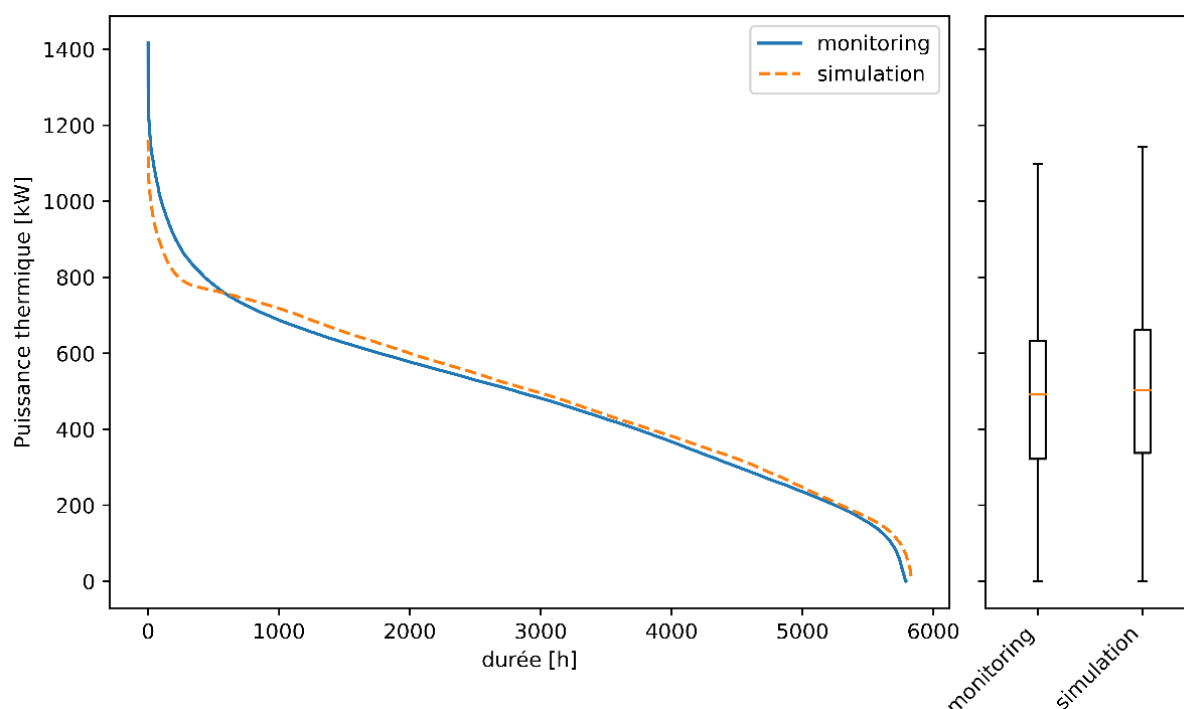


Figure 16 : Comparaison des monotones de puissance de la chaudière 2
issus du monitoring de la chaufferie du CAD des Marais-Rouge et des simulations

Ainsi, aux vues des comparaisons des monotones de puissance, ainsi qu'à la comparaison de la consommation de bois des chaudières, le modèle des chaudières est considéré comme valide pour la suite du rapport.

3.2.2 Emissions polluantes des chaudières

Les prévisions des émissions polluantes de chaudières à bois est une tâche complexe, les émissions polluantes dépendant d'une grande quantité de paramètres différents. En première approche, comme illustré sur le graphique de la Figure 17, on peut considérer que les émissions polluantes vont dépendre principalement de la phase de fonctionnement dans laquelle se trouve la chaudière, les phases principales étant : (1) le démarrage, (2) le fonctionnement stationnaire et (3) l'arrêt de la chaudière.

Lors du démarrage, la chaudière est généralement froide, ce qui engendre un pic d'émissions de COV (Composé Organiques Volatiles) ainsi que de CO (monoxyde de carbone). Un pic d'émissions de particules fines est également constaté, principalement des suies et des goudrons.

Durant la phase stationnaire, les émissions de polluants restent généralement stables, avec des émissions de CO et COV presque nulles, et des émissions de NOx et de particules fines de type sel presque constante.

Durant la phase d'arrêt, des émissions de CO nettement plus élevées sont constatées, liées à la phase de gazéification du charbon.

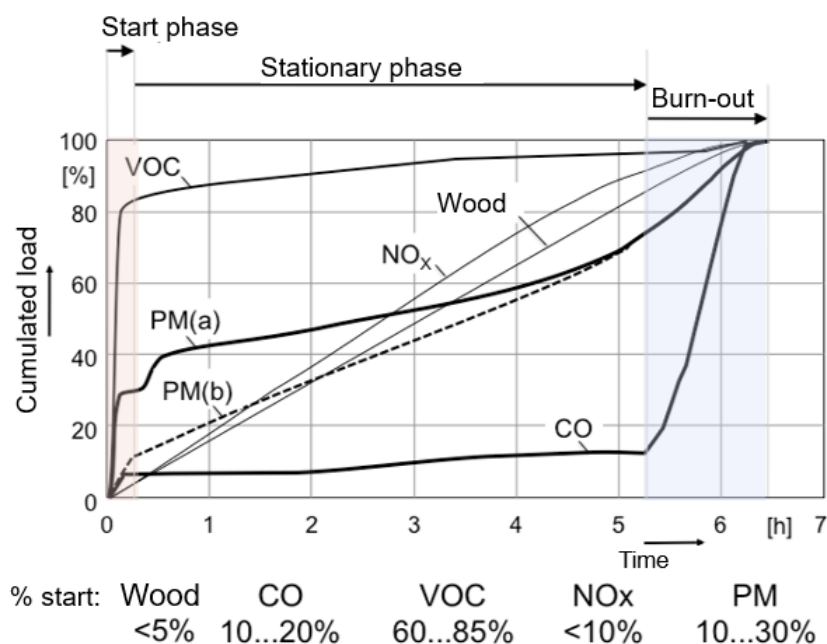


Figure 17: émission typique d'une chaudière à bûches de bois, extrait du cours HSLU de Thomas Nussbaumer

Lors de l'actualisation des facteurs d'émissions des chaudières à bois en 2020 [8], une répartition des facteurs d'émissions de polluants selon les phases de fonctionnement des chaudières à bois a été réalisée. Les phases de fonctionnement considérées dans ce document sont les suivantes :

- Phase de démarrage
- Phase d'arrêt
- Pleine charge
- Charge partielle
- Standby

Pour chacune de ces phases, des facteurs d'émissions pour les différents polluants ont été définis en g/GJ. Il a donc été décidé ici d'utiliser ces facteurs d'émissions en combinaison avec le modèle de chaudière simple décrit précédemment pour estimer les émissions de polluants.

La démarche générale retenue est la suivante :

1. L'état de fonctionnement de la chaudière est calculé par la simulation selon le taux de charge de l'accumulateur, comme décrit précédemment.
2. Pour chaque état de fonctionnement, l'énergie produite dans ce mode de fonctionnement est calculée, et la quantité de polluants émise est obtenue en multipliant l'énergie fournie par le facteur d'émission respectif.

Les valeurs utilisées dans ce travail sont celles de la catégorie de chaudières à bois 16a, « Chauffages automatique de puissance >500 kW externe à une entreprise de transformation du bois » selon la statistique suisse de l'énergie du bois [9]. Les facteurs d'émissions considérés sont résumés dans le tableau suivant.



Phase	CO (g/GJ)	Particules fines (g/GJ)	NOx (g/GJ)
Démarrage	685	50	182
Arrêt	1209	50	139
Pleine charge	45	10	125
Charge partielle	64	2.8	104
Standby	665	10	101

Les émissions de COV sont considérées comme directement liées à celles de CO et un facteur de multiplication de 7% est considéré.

Le tableau suivant résume les critères retenus pour déterminer le mode de fonctionnement de la chaudière.

Phase	Critères
Démarrage	• Chaudière précédemment à l'arrêt ou en standby • Taux de charge de l'accumulateur < 60%
Arrêt	• Chaudière en fonction • Puissance de chaudière minimale (30%) • Accumulateur chargé à 90%
Pleine charge	• Chaudière fonctionnant entre 65 et 100% de sa puissance nominale
Charge partielle	• Chaudière fonctionnant entre 30 et 65% de sa puissance nominale
Standby	• Chaudière à l'arrêt depuis plus de 5 heures

Une analyse de sensibilité des différents critères sera faite afin de s'assurer de leur plausibilité.

3.3 Modélisation des condenseurs de fumées

Sur le réseau des Ponts-de-Martel, les chaudières à bois ont été équipées de condenseur de fumée afin d'augmenter l'efficacité énergétique de la chaufferie. Ceux-ci sont installés en amont des chaudières et permettent de préchauffer l'eau du réseau retournant à la centrale. Ceci est bénéfique puisque cela permet une récupération d'énergie sinon perdue dans les fumées et de limiter la recirculation d'eau des chaudières à bois qui ne doivent pas avoir des températures en entrée du corps de chauffe inférieur à 65°C. De plus, étant donné que les chaudières utilisent un combustible très humide), le potentiel de condensation est élevé et d'autant plus intéressant. Il est évalué à entre 10 et 15% de la production totale de chaleur.

Le modèle de chaudières bois choisi sur TRNSYS (type 869) permet de simuler une petite chaudière à condensation. Ce modèle avec condenseur intégré n'est pas adapté aux



architectures rencontrées dans les chaufferies de grandes puissances. Les condenseurs sont souvent découplés des corps de chauffe comme dans le cas de la chaufferie des Ponts-de-Martel. Pour pallier ce problème le type 869 est seulement utilisé pour modéliser les chaudières bois et les condenseurs sont modélisés avec une simple équation présentée ci-après. La Figure 18 présente le schéma de principe d'un condenseur de fumée et des grandeurs associées.

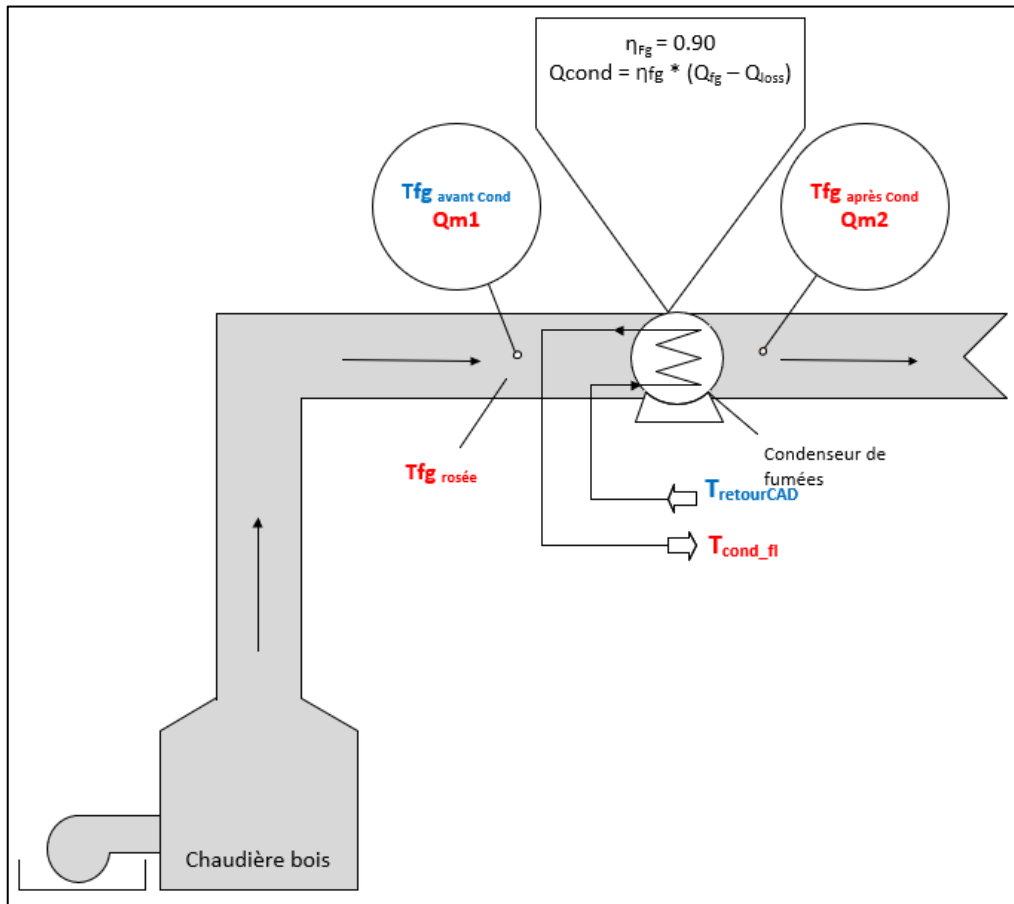


Figure 18: Schéma explicatif chaudières bois et condenseur
(des filtres présents entre la chaudière et les condenseurs ne sont pas représentés sur ce schéma)

Il a été déterminé à partir des mesures de mesure de puissance sur les condenseurs que le taux de récupération de chaleur contenu dans les fumées est proportionnel au facteur $\left(1 - \frac{T_{retour,CAD}}{T_{fg,dp}}\right)$.

De ce fait, l'équation suivante peut être utilisée pour calculer la puissance du condenseur à partir de la quantité de chaleur contenue dans les gaz de combustion Q_{fg} :

$$P_{con} = (Q_{fg} - Q_{fg,loss}) * \left(1 - \frac{T_{retour,CAD}}{T_{fg,dp}}\right) * f \quad (3)$$

Le terme « $1 - \frac{T_{retour,CAD}}{T_{fg,dp}}$ » correspond à un facteur de correction (entre 0 et 1) qui prend en compte l'effet de la température de retour du fluide du CAD ($T_{retour,CAD}$) et de la température



de rosée des fumées en sortie des chaudières ($T_{fg,dp}$). Celle-ci est calculé directement dans le modèle de la chaudière. Plus la température de retour du CAD est basse, plus le taux de récupération de chaleur sera grand. La température de rosée des fumées des chaudières est relativement constante et dépend de la teneur en eau du combustible (par simplification dans le modèle un taux d'humidité du bois constant est utilisé). Par conséquent, la quantité de chaleur qui peut être récupérée par le condenseur sera plus important si la température de retour du réseau thermique urbain est basse. En outre, des pertes de chaleur sont prises en compte à travers la constante $Q_{fg,loss}$. Finalement, afin de calibrer au mieux le modèle un facteur de correction « f » a été introduit et déterminé pour chaque chaudière.

La validation du modèle pour les 2 condenseurs donne de bon résultats (voir Figure 19). Les valeurs de cvRMSE sont proches de 30 % pour les deux condenseurs (31,9 % pour le condenseur 1 et 38,9 % pour le condenseur 2). Le comportement dynamique des condenseurs est relativement bien représenté en considération des données d'entrée et du bruit des mesures.

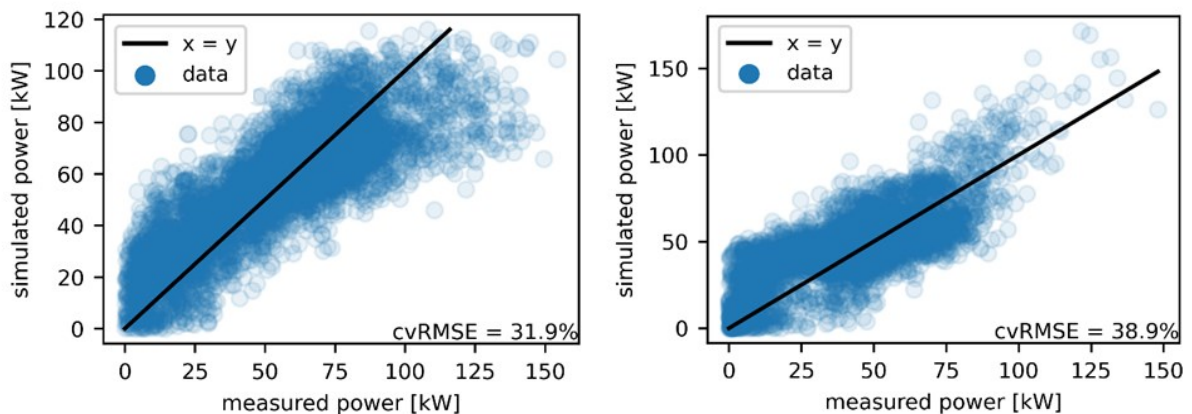


Figure 19 : Comparaison des données de monitoring et des simulations pour les condenseurs 1 (gauche) et 2 (droite) modélisés avec l'équation (3)

4 Évaluation des résultats obtenus

Les objectifs du WP1 sur le dimensionnement et la modélisation d'une chaufferie Bois de référence ont été atteints avec succès. Les modèles numériques choisis et calibrés présentent une validité suffisante pour les études envisagées. Notamment, les valeurs de cvRMSE inférieur ou proche de 30% montrent que les modèles sont capables de bien représenter le comportement dynamique des chaudières et des condenseurs. Cet élément est essentiel pour la modélisation de la régulation du système. Enfin les émissions polluantes des chaudières en termes de NOx, CO, COV et particules fines ont été rassemblée par phase de fonctionnement de la chaudière à bois. Cette approche dont les données ont déjà été validées est jugée suffisante pour la suite du projet.



5 Suite de la procédure

Pour l'année 2024, la suite des activités du projet OptiCADSol sont les suivantes :

- Dans le cadre du WP2 :
 - Définir, des schémas hydrauliques optimisés du couplage d'une ou plusieurs chaudières bois avec une installation solaire thermique et un stockage de chaleur
 - Définir et optimiser des stratégies de dimensionnement et de régulation correspondantes.
- Dans le cadre du WP3 :
 - Définir deux cas de référence de centrale de chauffe intégrant une PAC et une installation photovoltaïque : 1) PAC monovalente : la PAC seule fournira la totalité des besoins de chaleur toute l'année et 2) PAC bivalente : la PAC ne sera utilisée que pendant la période estivale
 - Modéliser la centrale de chaleur pour les deux cas



6 Bibliographie

- [1] Nussbaumer T. Guide de planification - Chauffage à distance. Bern: 2018.
- [2] CSD ingénieurs SA. Perspectives chaleur - Perspectives de valorisation du potentiel de chaleur renouvelable du canton de Vaud. Lausanne: 2021.
- [3] Von Gunten D, Rager J, Puthod L, Dériaz T, Deschaintre L, Robineau J-L, et al. SolCAD – Potentiel du solaire thermique chauffages à distance en Suisse dans. Bern: 2022.
- [4] Good J, Thalmann S, Nussbaumer T, Keel A, Jenni A, Küttel P, et al. Planungshandbuch, Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 4. 3. Auflage. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V.; 2022.
- [5] Faessler J, Holzmüller P, Mermoud F, Sig R, Monnard : M. Réseaux thermiques multi-ressources efficaces et renouvelables : Retour d'expérience sur la rénovation de la chaufferie de quartier de Laurana-Parc à Thônex (GE) 2016.
- [6] Schneider S, Brischoux P, Santandrea D, Holzmüller P. Retour d'expérience énergétique sur le quartier des Vergers à Meyrin (Genève) - Rapport intermédiaire 2020.
- [7] Haller MY, Paavilainen J, Konersmann L, Haberl R, Dröscher A, Frank E, et al. A unified model for the simulation of oil, gas and biomass space heating boilers for energy estimating purposes. Part I: Model development. J Build Perform Simul 2011;4:1–18. <https://doi.org/10.1080/19401491003671944>.
- [8] Zotter SP, Nussbaumer T. Aktualisierung Emissionsmodell Holz-feuerungen 2020. Zürich: 2022.
- [9] Ruoss F, Hauser C. Schweizerische Holzenergiestatistik Erhebung für das Jahr 2022. Bern: 2023.



7 Annexes

7.1 Annexe 1 : Liste des paramètres des combustibles et chaudières à bois

Ci-dessous, un extrait des paramètres des combustibles et chaudières à bois modifiés après une analyses des performances des chaudières des Marais-Rouge et du combustible.

Numéro paramètres	Nom du paramètre	Valeur	Unité	Description traduit
1	GHV	22570	MJ/kg	PCS
3	wC	0,5	string	wC : fraction massique de carbone dans le combustible sec.
3	wH	0,06	string	wH: fraction massique d'hydrogène dans le combustible sec.
4	wO	0,06	string	wO : fraction massique d'oxygène dans le combustible sec.
5	wN	0,002	string	wN : fraction massique d'azote dans le combustible sec.
6	wS	0,00005	string	wS : fraction massique de soufre dans le combustible sec.
7	wAsh	0,027	string	wA : fraction massique de cendres (résidus non volatils) de combustible sec.
8	wH2O	0,75	string	wH2O ; teneur en eau du combustible par kg de combustible sec (utilisé notamment pour les combustibles ligneux)
9	CpFuel	1,115	kJ/kg.K	cpFuel ; Capacité thermique du combustible sec
14	Pstart	$P_{Boi_{nom_kjph}} * 0.3$	kJ/hr	Puissance moyenne du brûleur pendant la période de démarrage (basée sur le PCS et le taux de consommation de combustible)
15	C_therm	24278.8	kJ/K	capacité thermique d'une chaudière vide
16	Volume	5.8	m ³	Volume du fluide liquide dans la chaudière
39	dtStart	4	hr	le temps nécessaire à la chaudière bois pour démarrer et stabiliser la flamme
40	dtBurnMin	3	hr	Temps minimum que le brûleur restera allumé même s'il dépasse Toff, mais pas s'il atteint Tmax.
41	dtOffMin	3	hr	Temps d'arrêt minimum après l'arrêt du brûleur