SHaKE
Sharing Knowledge on Energy Communities

Co-funded by the European Union

Module 5
Systèmes avancés en chauffage et climatisation urbains

Fait partie du programme pédagogique SHaKE sur les réseaux de chaleur et de froid

Guide pédagogique

Ressource pédagogique réutilisable pour l'enseignement supérieur et la formation professionnelle

Version : 1.0
Date : mars 2026

https://www.shakeproject-dhc.eu/

Projet
Sharing Heat and Knowledge on Energy Communities (SHaKE)
Erasmus+ KA220-HED – Partenariats de coopération dans l'enseignement supérieur
N° du projet : 2023-1-HU01-KA220-HED-000160219

Auteurs
Dr. Antoine Fabre, Dr. Pascal Stabat (Mines Paris – PSL)

Éditeurs
Eva Szalma, Dr. Antoine Fabre, Dr. Pascal Stabat, Ghad Alarnaot Alarnaout

Reconnaissance du financement européen et clause de non-responsabilité

Financé par l'Union européenne. Les points de vue et opinions exprimés n'engagent que leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'Union européenne ou de la Fondation publique Tempus. Ni l'Union européenne ni l'autorité chargée de l'octroi de la subvention ne peuvent en être tenues responsables.

Coordonnateur
Université de technologie et d'économie de Budapest, Hongrie

Établissements partenaires
Universitat Jaume I de Castellón, Espagne
Mines Paris – PSL, France

Remerciements
Cette publication a été élaborée dans le cadre du projet SHaKE. Le consortium remercie les enseignants, chercheurs, professionnels et autres parties prenantes ayant contribué à l'élaboration, à la révision et à l'amélioration des ressources pédagogiques.

Licence
Sauf indication contraire, ce matériel est mis à disposition sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Toute diffusion ou adaptation doit mentionner le projet SHaKE et ses auteurs, fournir un lien vers la licence et signaler les modifications éventuelles.

Référence bibliographique suggérée :

Mines Paris – PSL. Module 5 : Systèmes avancés en chauffage et climatisation urbains. Projet SHaKE, 2026.

https://www.shakeproject-dhc.eu/

Guide d'utilisation du module 5

Ce module fait partie des ressources pédagogiques SHaKE destinées à l'enseignement des réseaux de chaleur et de froid urbains dans l'enseignement supérieur et la formation professionnelle.

Le module 5 porte sur des approches avancées d'amélioration des performances des réseaux de chaleur et de froid urbains. Il présente les difficultés d'exploitation des réseaux existants et les méthodes destinées à améliorer leur efficacité, leur fiabilité et leur durabilité. Une attention particulière est accordée à la réduction des températures de retour, aux systèmes hydrauliques côté bâtiment, au diagnostic des dysfonctionnements et à l'exploitation des données opérationnelles pour optimiser les réseaux.

Il présente les principales sources de fonctionnement non optimal : fuites, dysfonctionnements côté secondaire, défauts des vannes de régulation et des actionneurs, problèmes des systèmes de contrôle et des échangeurs de chaleur. Il examine également les choix de conception côté secondaire, les configurations de production d'eau chaude sanitaire et les modèles tarifaires.

Les outils de détection des anomalies et des défauts sont abordés au moyen d'indicateurs, d'études de cas, d'exercices techniques et d'activités de modélisation numérique.

Ce guide s'adresse principalement aux enseignants, chargés de cours et formateurs. Il peut être utilisé pour des cours magistraux, des activités hybrides, des discussions, des travaux pratiques, des études de cas et la formation professionnelle continue. Les étudiants et professionnels disposant de connaissances de base dans le domaine peuvent également l'utiliser en autonomie.

Principaux thèmes du module

- Situation actuelle des réseaux de chaleur et de froid urbains en Europe
- Politiques, tendances de développement et intégration des énergies renouvelables dans les RDC
- Amélioration des performances des réseaux RDC
- Réduction des températures de retour et effet sur le rendement du réseau
- Défauts et dysfonctionnements courants des réseaux RDC
- Fuites, défauts côté secondaire, vannes de régulation et actionneurs
- Défauts des systèmes de régulation et des échangeurs thermiques
- Systèmes hydrauliques côté bâtiment et effet sur les performances des RDC
- Configurations d'eau chaude sanitaire et influence sur la température de retour
- Modèles tarifaires de chaleur et incitations à améliorer les performances côté client
- Méthodes de détection des anomalies et des défauts
- Indicateurs pratiques utilisés par les exploitants des réseaux RDC
- Données d'exploitation pour la détection des dysfonctionnements
- Modélisation et analyse simples des performances des réseaux RDC
- Méthodes de régulation et approches d'optimisation des systèmes avancés de RDC

Résultats d'apprentissage du module 5

Ce module vise à développer les compétences suivantes.

À l'issue du module, les apprenants devraient être capables de :

- Expliquer pourquoi l'amélioration des performances des RDC contribue à la décarbonation et à l'intégration des énergies renouvelables
- Définir les conséquences d'un fonctionnement non optimal des réseaux RDC
- Identifier les principales causes de sous-performance et de dysfonctionnement des réseaux RDC
- Reconnaître les défauts courants liés aux fuites, systèmes secondaires, vannes de régulation, actionneurs, régulateurs et échangeurs thermiques
- Expliquer l'influence des systèmes hydrauliques secondaires sur la température de retour du réseau primaire
- Comparer les solutions techniques visant à améliorer les performances des installations côté bâtiment et des sous-stations
- Identifier des mesures adaptées d'exploitation et de conception pour améliorer les performances des réseaux RDC
- Expliquer le rôle des modèles de tarification incitatifs dans l'amélioration des performances côté client
- Distinguer les approches de détection des anomalies et de détection des défauts
- Appliquer des indicateurs simples de détection des défauts à des problèmes d'exploitation sélectionnés
- Interpréter les principales données d'exploitation relatives aux sous-stations et aux réseaux RDC
- Créer ou interpréter un modèle simple de RDC pour analyser ou optimiser les performances

Charge de travail estimée

Ce module représente environ 9,5 heures d'apprentissage, comprenant les cours magistraux, les études de cas, le travail personnel et l'évaluation.

Les enseignants peuvent adapter la charge de travail en fonction du niveau de formation, des supports sélectionnés et des modalités pédagogiques. Le module peut être utilisé comme :

- une unité d'enseignement complète,
- un ensemble de supports pour des cours sélectionnés,
- une composante d'apprentissage hybride,
- un ensemble d'exercices pratiques,
- un ensemble d'études de cas,
- ou une ressource complémentaire pour des cours existants.

Activités et heures d'apprentissage

Type d'activité	Durée (heures)	Description
Cours magistraux	5 h	Séquence 1 : État actuel des RDC dans l'UE et politiques associées Séquence 2 : Possibilités d'amélioration des performances des RDC Séquence 3 : Amélioration des performances par les systèmes hydrauliques côté bâtiment Séquence 4 : Outils et indicateurs de détection des dysfonctionnements Séquence 5 : Méthodologie de modélisation des RDC et données associées Séquence 6 : Méthodes de régulation et approches alternatives d'optimisation
Études de cas	2 h	Séquence 2 : Analyse des effets des stratégies de régulation et des dysfonctionnements à partir d'un modèle numérique Séquence 3 : Analyse de différentes architectures de réseau à partir d'un modèle numérique
Travail personnel	2 h	Préparation à l'évaluation et recherches pour le projet
Évaluation	30 min	Quiz, projet
Durée totale	9 h 30	

Publics cibles

Ce guide est principalement destiné aux enseignants, chargés de cours et formateurs souhaitant utiliser ou adapter les ressources SHaKE dans leurs activités pédagogiques.

Les principaux publics cibles sont :

- les enseignants du supérieur en ingénierie, génie climatique, systèmes énergétiques et domaines connexes,
- les formateurs de la formation professionnelle et continue sur les réseaux de chaleur et de froid,
- les enseignants développant des activités hybrides, modulaires ou axées sur la pratique,
- les personnels universitaires recherchant des ressources pédagogiques réutilisables sur les systèmes énergétiques urbains durables,
- les enseignants et formateurs travaillant sur l'exploitation et l'optimisation des RDC, les sous-stations et l'efficacité énergétique.

Ces ressources peuvent aussi être utilisées par des étudiants, des professionnels et des apprenants autonomes. Pour une utilisation indépendante, des connaissances de base dans les domaines techniques concernés sont recommandées.

Utilisation recommandée par les enseignants et formateurs

Le module 5 peut être utilisé comme unité d'enseignement complète ou sous forme de ressources sélectionnées. Les enseignants peuvent combiner les supports selon le niveau du cours, le temps disponible et les objectifs pédagogiques.

Besoin pédagogique	Ressource proposée du module 5
Introduire le sujet	Utiliser la présentation du module et les diapositives d'introduction pour présenter l'intérêt des systèmes avancés de RDC, l'amélioration des performances et les faibles températures de retour.
Préparer les apprenants avant le cours	Proposer la lecture préalable de sections du guide pour une classe inversée ou une activité hybride.
Accompagner les cours et séminaires	Utiliser les diapositives pour expliquer les difficultés de performance des RDC, les systèmes hydrauliques secondaires, les dysfonctionnements, la détection des défauts et l'optimisation.
Vérifier la compréhension	Utiliser les questions de la banque pour les discussions, les évaluations formatives ou les quiz en classe et sur les plateformes pédagogiques.
Développer les compétences pratiques	Utiliser l'exercice pratique et les études de cas pour les travaux de groupe, devoirs, projets, analyses numériques et séances guidées de modélisation.
Soutenir les discussions fondées sur les données	Utiliser les sections consacrées à la détection des anomalies, aux indicateurs de défaut et aux données d'exploitation pour discuter du suivi et du diagnostic des RDC.
Favoriser la révision individuelle	Inviter les apprenants à compléter le quiz d'autoévaluation après avoir étudié les ressources.
Adapter au contexte pédagogique	Sélectionner, combiner ou modifier les sections du guide, les diapositives, les questions et l'exercice selon le programme et le niveau des participants.

Parcours recommandé pour les apprenants autonomes

Les étudiants et professionnels qui étudient le module de manière autonome peuvent suivre les étapes ci-dessous.

Étape	Activité proposée
Consulter la présentation introductive	Se familiariser avec les principaux concepts, la terminologie et la structure du module.
Étudier le guide pédagogique	Lire les explications détaillées, les principes techniques et les notions d'exploitation.
Regarder la vidéo du module	Explorer un thème ou un aspect pratique à l'aide de la vidéo et des questions associées.

Étape	Activité proposée
Compléter le quiz d'autoévaluation	Vérifier la compréhension des notions clés et des principes techniques.
Réaliser l'exercice pratique	Appliquer les connaissances acquises à des analyses, modèles ou études de cas relatifs aux performances des RDC.
Consulter la banque de questions	Utiliser les questions pour réviser, discuter ou préparer une évaluation.

Ressources complémentaires disponibles

Les ressources d'apprentissage et d'évaluation disponibles comprennent :

- des diapositives de présentation des différents thèmes,
- une banque de questions réutilisable,
- un quiz d'autoévaluation du module,
- une vidéo accompagnée de questions d'évaluation,
- un ensemble d'exercices pratiques téléchargeables comprenant des fichiers Python et Jupyter Notebook ainsi que les dossiers de données, de modèles, d'images et de résultats nécessaires,
- des études de cas et mini-projets basés sur l'analyse numérique des performances des sous-stations et des réseaux RDC, utilisables pour des travaux de groupe, des devoirs, des rapports techniques ou des présentations orales.

Table des matières

Projet 2

Auteurs 2

Éditeurs 2

Financement européen et clause de non-responsabilité 2

Coordonnateur 2

Établissements partenaires 2

Remerciements 2

Licence 2

1. Amélioration des performances des RDC ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.1. Aperçu des pannes dans les RDC ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.1.1. Fuites ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.1.2. Défaillances côté secondaire ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.1.3. Vannes de régulation et actionneurs ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.1.4. Systèmes de régulation et contrôleur ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.1.5. Échangeur de chaleur ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.1.6. Conclusion ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.2. Conception des systèmes hydrauliques secondaires ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.2.1. Impact des émetteurs et de la régulation du débit secondaire ... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.2.2. Impact de la configuration hydraulique ECS ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.2.3. Conclusion sur la meilleure configuration hydraulique ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.2.4. Modèles tarifaires de chaleur ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.3. Détection des défauts ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.3.1. Difficultés de détection des dysfonctionnements ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.3.2. Qu'est-ce que la détection des dysfonctionnements ?**Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.3.3. Détection des anomalies ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.3.3.1. Visualisation et analyse manuelle ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.3.3.2. Seuils ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.3.3.3. Régression ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.3.3.4. Classification ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.3.3.5. Regroupement ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.3.4. Indicateurs couramment utilisés par les exploitants .. **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

1.3.5. Détection des défauts ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

Références 46

- Amélioration des performances des RDC

Pour atteindre l'objectif européen relatif aux réseaux de chaleur et de froid urbains (RDC), les performances des réseaux existants doivent être améliorées. Pour les réseaux de chauffage, améliorer la performance signifie principalement augmenter la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. En pratique, cela implique généralement de réduire la température globale de retour du réseau, ce qui permet d'augmenter l'utilisation de sources d'énergie renouvelable à basse température telles que l'énergie géothermique et la chaleur résiduelle, tout en réduisant les pertes de chaleur dans les tuyaux et la consommation d'énergie dans les pompes primaires.
Par conséquent, les opérateurs de RDC visent à atteindre la température globale de retour la plus basse possible. Atteindre cet objectif nécessite une compréhension détaillée du fonctionnement du réseau. Les opérateurs des RDC sont principalement responsables de la gestion des centrales de production de chaleur, du réseau primaire et du côté primaire des postes de retrait. Compte tenu de la complexité d'un RDC et des stratégies de contrôle relativement simples généralement basées sur des connaissances expertes, il subsiste un potentiel d'optimisation important
Cependant, comme la fourniture en chaleur dans les RDC dépend de nombreux composants de contrôle, mécaniques et hydrauliques, des dysfonctionnements peuvent survenir. Un équipement inapproprié ou défectueux n'importe où dans le réseau peut avoir un impact négatif sur la température globale de retour. Ainsi, avant d'envisager l'optimisation des contrôles, il est essentiel de s'assurer que le réseau fonctionne correctement. Cependant, selon [1], dans une étude menée sur deux réseaux suédois, seulement 26 % des sous-stations fonctionnaient correctement. Les dysfonctionnements dans les sous-stations ne perturbent pas nécessairement le service, mais ils peuvent avoir un impact significatif sur la performance globale du RDC. Il est donc essentiel d'être conscient des dysfonctionnements les plus courants et de ceux qui ont le plus grand impact sur la performance.

- Aperçu des pannes dans les RDC

En raison de la complexité du fonctionnement du RDC, les causes des dysfonctionnements peuvent être très diverses. Une étude menée sur plusieurs réseaux suédois [2] a identifié les différentes causes possibles des dysfonctionnements réseau et leur récurrence (voir Figure 1)

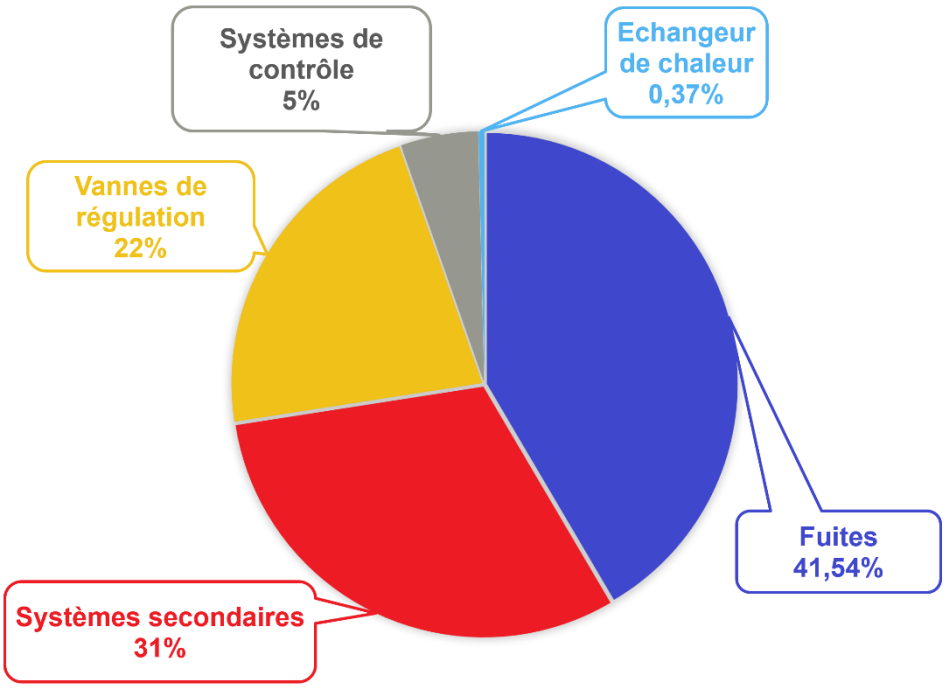


Figure 1 Source et récurrence des dysfonctionnements d'un RDC (adapté de[2])

Les dysfonctionnements sont divisés en 5 catégories selon la localisation ou le type de dysfonctionnement : fuites, défauts dans les systèmes secondaires (installation client), défauts dus à la vanne de contrôle et à l'actionneur de la sous-station, défauts dans les systèmes de contrôle et contrôleurs, et défauts dans l'échangeur de chaleur. Il semble que les deux principales sources de dysfonctionnement soient les fuites et les problèmes des systèmes hydrauliques côté bâtiment. La localisation des différentes défaillances identifiées est illustrée dans la Figure 2. Chaque catégorie de dysfonctionnement est décrite et expliquée dans les sections suivantes.

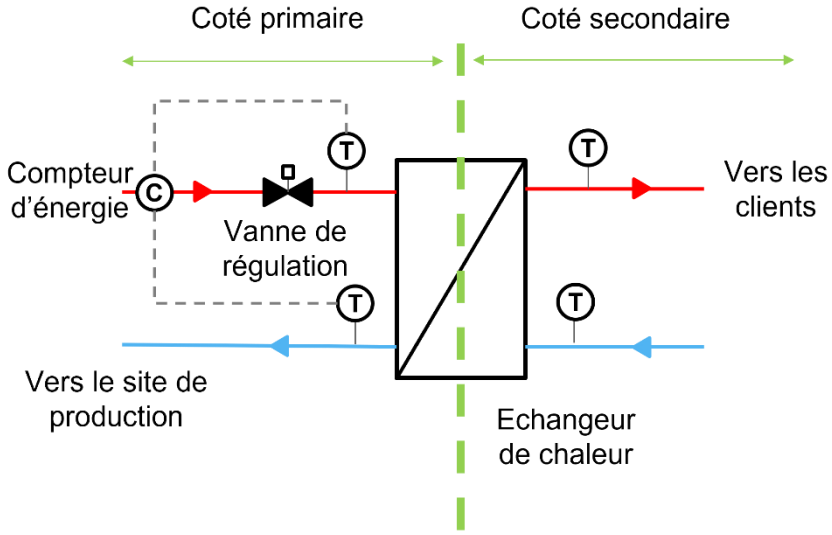


Figure 2 Localisation de dysfonctionnement

- Fuites

Les fuites représentent 42 % des défauts dans les RDC. Elles se trouvent principalement sur le réseau primaire mais aussi sur l'échangeur de chaleur et les vannes de contrôle. Les fuites peuvent être séparées en 2 catégories [3] :

- Pertes de chaleur dues à la détérioration de l'isolation des tuyaux ou à des défauts d'installation ou de conception
- Fuite d'eau due au vieillissement des matériaux, à des dommages accidentels (c'est-à-dire des travaux publics proches du réseau) ou à des défauts d'installation ou de conception.

Certains RDC peuvent avoir des taux de fuite significatifs dépassant 10 % du volume total d'eau distribuée, en particulier dans les réseaux plus anciens.
Les fuites entraînent des conséquences directes et indirectes sur la performance énergétique, économique et environnementale d'un DHC :

- Surconsommation d'énergie pour maintenir la température et la pression du réseau
- Coûts élevés d'exploitation et d'entretien
- Risques pour la santé et l'environnement (contamination des sols et des eaux souterraines)

- Défaillances côté secondaire

La catégorie « dysfonctionnements côté secondaires » inclut tous les problèmes détectés dans les systèmes de chauffage internes des clients. Le grand nombre de problèmes dans cette catégorie est dû au fait que les opérateurs n'ont généralement aucun contrôle ni accès aux données provenant de cette partie du réseau. Une distribution des défauts plus détaillée est présentée sur la Figure 3 selon [2].

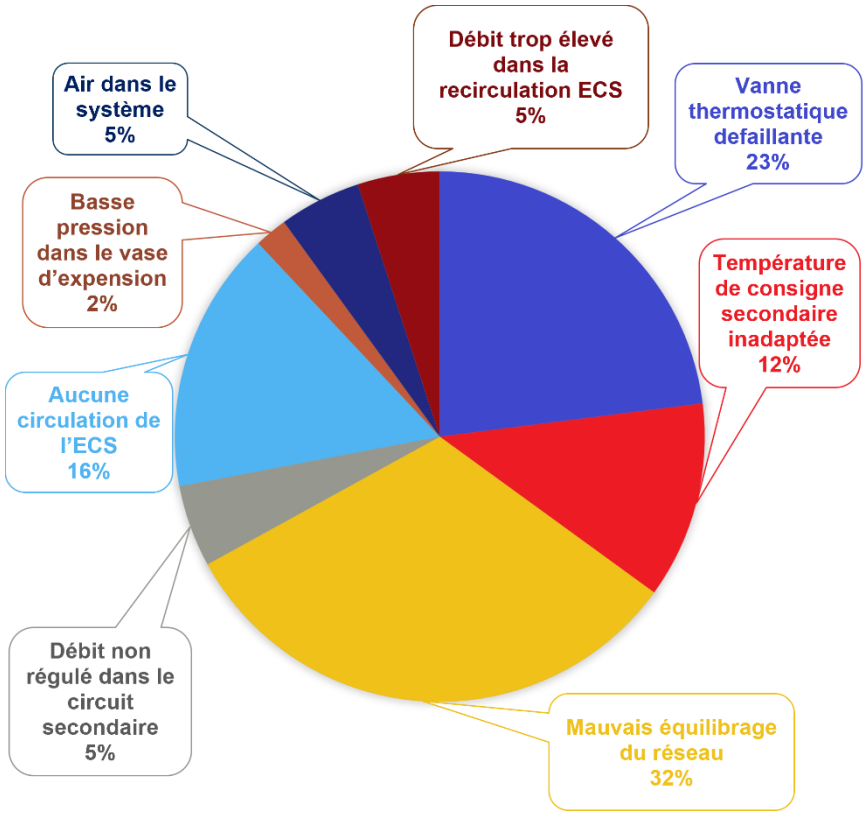


Figure 3 Distribution des défauts dans le système hydraulique des clients (adapté de [2])

Le problème le plus courant est le mauvais équilibrage du réseau secondaire (32 %). Comme présenté dans le module 2, ce dysfonctionnement peut entraîner un inconfort

thermique pour les clients causé par un manque de débit dans certains émetteurs. Comme les opérateurs ne peuvent généralement pas intervenir sur les systèmes secondaires, ils augmentent généralement la température d'alimentation secondaire, ce qui entraîne une surconsommation et une température de retour plus élevée.
Le deuxième problème le plus courant est l'absence ou la défaillance des vannes thermostatiques (23 %). Ce problème peut être détecté par un problème de débit incontrôlé dans les systèmes secondaires (5 %). En effet, des vannes thermostatiques cassées ou manquantes entraînent un débit incontrôlé dans les systèmes secondaires, entraînant une surconsommation ou des températures de retour élevées et un inconfort thermique potentiel pour les clients.
Un autre dysfonctionnement fréquent concerne l'alimentation en eau chaude sanitaire (ECS), soit due à l'absence de recirculation ECS (16 %), soit à une recirculation excessive ECS (5 %). Dans les systèmes ECS, la recirculation fait référence au débit utilisé pour maintenir une température minimale dans le circuit hydraulique ECS (> 55°C) afin d'empêcher la formation de la légionelle lorsque l'eau chaude n'est pas consommée. Ces deux problèmes entraînent des températures de retour élevées ; cependant, ils résuBTent plus souvent de choix de conception inappropriés que de véritables dysfonctionnements.
Le dernier dysfonctionnement courant est un problème de contrôle, une température de consigne départ secondaire supérieure à la température aller primaire du réseau primaire. Cette panne survient principalement en été, lorsque seule l'ECS est nécessaire, permettant de réduire la température du réseau primaire tandis que certains clients maintiennent la même température de point consigne toute l'année. Cela a conduit à des débits inutilement élevés dans les RDC, entraînant une augmentation de la température de retour.
Les problèmes identifiés par les opérateurs de RDC sont un mélange de dysfonctionnements et de systèmes inadaptés sur les systèmes hydrauliques des clients. Les solutions pour résoudre ces problèmes sont abordées à la section 1.3.

- Vannes de régulation et actionneurs

Cette catégorie de défaut inclut les problèmes mécaniques sur les vannes de regulation et sur les dispositifs qui ajustent l'ouverture des vannes, appelés actionneurs. La répartition de cette catégorie de défauts est illustrée dans Figure 4.

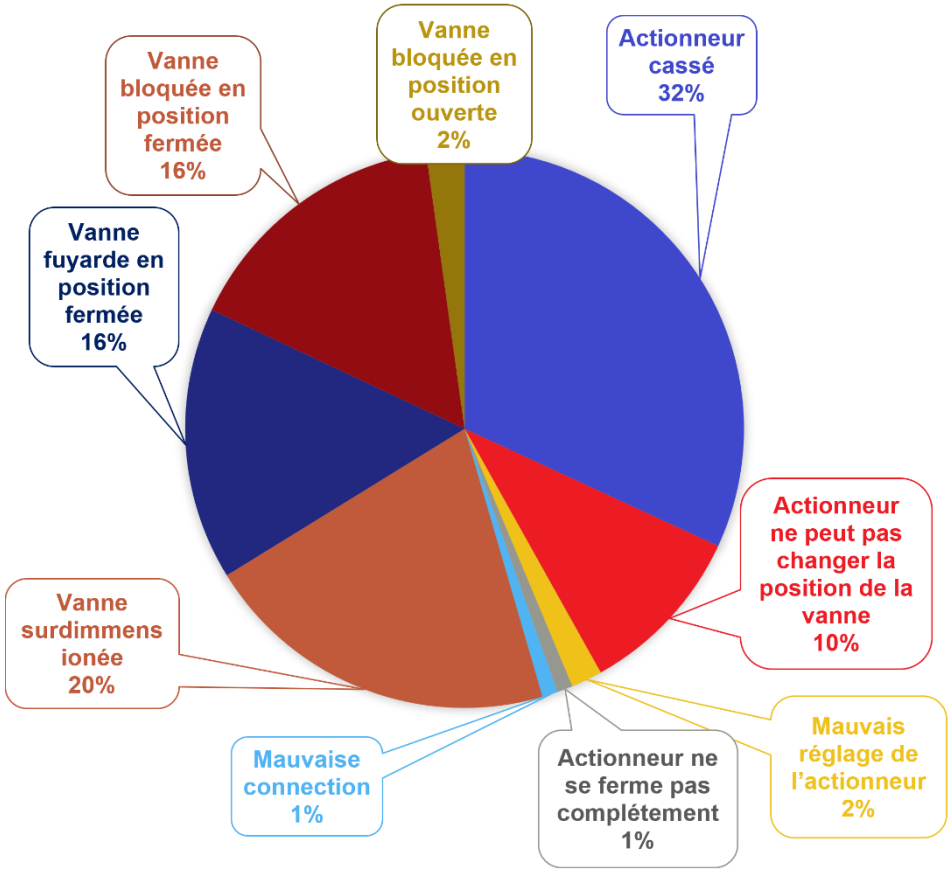


Figure 4 Répartition des défauts sur les problèmes de vannes de régulation et d'actionneurs (adapté de [2])

Les problèmes les plus courants avec les vannes de régulation et les actionneurs (c'est-à-dire un actionneur cassé, un actionneur incapable de changer la position de la vanne, une vanne de contrôle coincée en position fixe) entraînent une incapacité de la vanne à s'ouvrir ou se fermer correctement, empêchant le contrôle correct du débit primaire. Ce dysfonctionnement représente environ 76 % des problèmes détectés dus aux vannes de commande et actionneurs. Le manque de contrôle du débit primaire peut avoir des impacts différents pour le client ou le réseau, suivant la position de la vanne bloquée. Cela peut causer un inconfort pour le client et/ou une augmentation de la température de retour primaire.

L'autre problème courant est le surdimensionnement des vannes (20 %). Si une vanne est surdimensionnée, elle fonctionnera principalement en position partiellement ouverte où la caractéristique de contrôle est très précise. Cela provoque donc une variation rapide et brutale du débit ainsi que des oscillations de température et de pression. À la fin, cela peut entraîner une consommation plus élevée de la pompe et une usure prématurée.

- Systèmes de régulation et contrôleur

Les systèmes de régulation de catégorie et le contrôleur incluent les problèmes affectant tous les dispositifs utilisés pour envoyer des commandes d'ouverture ou de fermeture aux vannes telles que les capteurs, les lois d'eau de température départ secondaire et le contrôleur. La répartition de cette catégorie de défauts est illustrée sur la Figure 5.

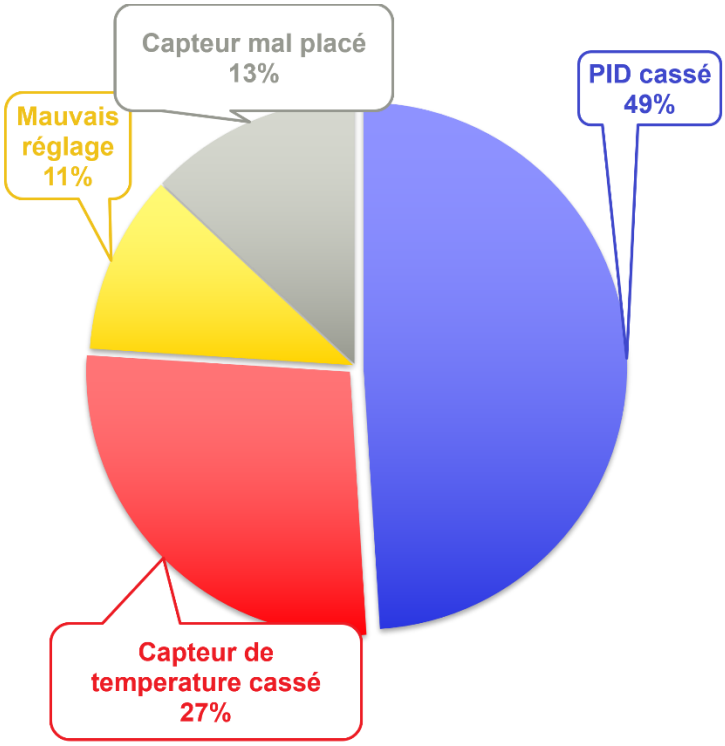


Figure 5 Répartition des pannes sur les systèmes de régulation et problèmes de contrôleur (adapté de [2])

Les défauts les plus courants concernent des pannes de dispositifs, des contrôleurs ou des capteurs (76 %). L'opérateur a également constaté que des capteurs mal placés sont un problème fréquent (13 %). Tous ces défauts entraînent un mauvais contrôle entraînant des températures anormales. Le dernier défaut est causé par les clients eux-mêmes, qui modifient manuellement les valeurs de consigne de température départ secondaires.

- Échangeur de chaleur

La dernière catégorie concerne les questions liées aux échangeurs de chaleur. En général, les échangeurs de chaleur sont bien surveillés par l'opérateur. Cependant, la qualité de l'eau dans le réseau peut parfois entraîner un encrassement des échangeurs de chaleur, ce qui dégrade l'efficacité de l'échangeur.

- Conclusion

Cette présentation des dysfonctionnements courants dans les RDC montre que pratiquement tous les dysfonctionnements impactent soit le confort thermique du client, soit la température de retour primaire. Il est donc essentiel de corriger ces problèmes. De plus, des dysfonctionnements sont présents dans environ 75 % des sous-stations, ce qui rend toute optimisation inutile tant que ces problèmes ne sont pas résolus. Bien que les problèmes courants et les plus impactants soient connus, identifier leurs causes profondes reste difficile. En effet, les opérateurs ne gèrent que la partie primaire du système (y compris l'échangeur de chaleur et le capteur de température secondaire) et ont donc une visibilité limitée du côté client ou du bâtiment. De plus, pour la facturation, seules les données de consommations sont légalement requises. Ces données sont mesurées via un compteur d'énergie (voir module 2), qui peut fournir des informations sur le débit primaire, la température aller et de retour primaire. Ce manque de données rend donc la détection des dysfonctionnements particulièrement difficile. Ce défi est aggravé par le fait que les dysfonctionnements n'affectent pas nécessairement le confort des occupants.

En conclusion, améliorer les performances des RDC nécessite d'abord d'identifier les systèmes hydrauliques les plus adaptés à utiliser côté bâtiment ainsi que de détecter les dysfonctionnements avec précision et rapidité.

- Conception des systèmes hydrauliques secondaires

La plupart des systèmes DHC ont été connectés à des bâtiments existants avec leurs propres systèmes de distribution de chauffage internes, généralement non optimisés pour réduire les températures de retour. La section précédente montrait que 31 % des dysfonctionnements ou problèmes de sous-performance proviennent du côté client.

Ainsi, il existe un fort potentiel d'amélioration des performances des DH existantes et nouvelles. Un meilleur fonctionnement des postes réduit les températures de retour sur le réseau DH et améliore par conséquent l'efficacité du système DH. Cependant, il est souvent difficile pour les opérateurs DH de mettre en œuvre des actions de performance sur les installations clients car ils ne sont généralement pas responsables de leur exploitation et de leur maintenance.

Cette section vise à mettre en avant certaines recommandations pour améliorer la conception et le fonctionnement des systèmes de chauffage secondaire afin de réduire la température de l'eau de retour. La recommandation provient d'un rapport de l'AIE de l'Annexe XIII [4].

Sur la base de la revue de littérature [4], plusieurs types d'architecture hydraulique latérale secondaire ont été sélectionnés. Les actions de rétrofit étudiées peuvent être réalisées sur 4 composants du côté secondaire :

- Architecture de la sous-station

  Les architectures des postes ont un impact notable sur les performances du DHN. Comme montré dans le module 2, la configuration parallèle semble être la meilleure architecture de la sous-station en termes de performance et de contrôle. Cependant, cette étude ne compare pas toutes les architectures les plus courantes, en particulier une encore très courante en France avec un échangeur de chaleur global (voir Figure 6).

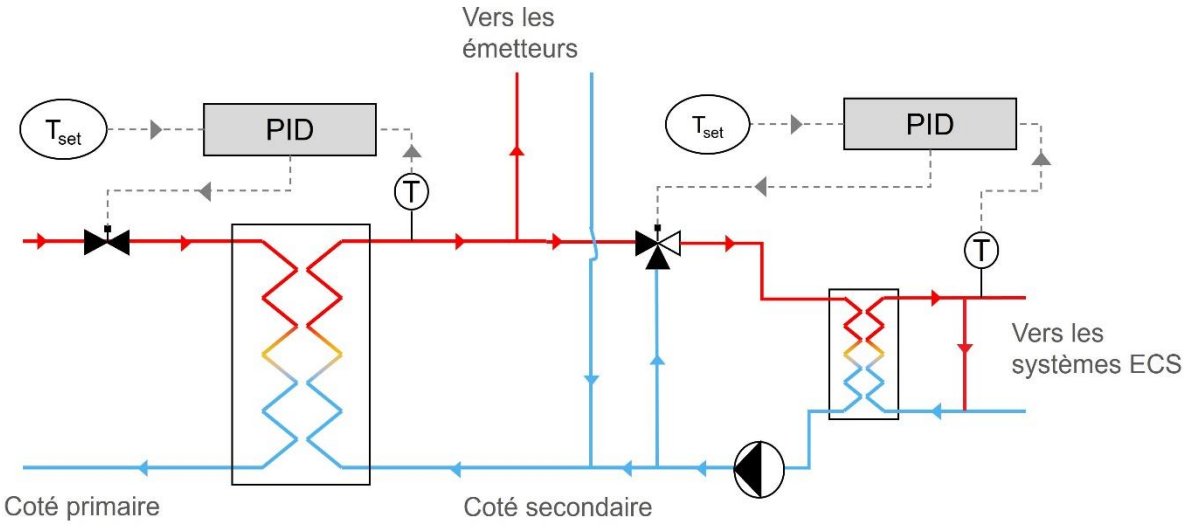


Figure 6 sous-station avec échangeur de chaleur global [4]

Contrairement à la configuration parallèle, un seul échangeur de chaleur est utilisé entre le côté primaire et le côté secondaire pour du chauffage et de l'ECS. Le débit primaire est contrôlé de la même manière que dans la configuration précédente. De plus, pour alimenter en ECS, un échangeur est utilisé sur le réseau secondaire, où le débit passant par l'échangeur est délivré par une pompe à débit constant et le contrôle de température est assuré par une vanne à trois voies dans laquelle une partie du débit d'entrée est mélangée à l'entrée d'eau.

- Le contrôle du débit secondaire

Les systèmes de contrôle sont installés pour contrôler le débit passant par les émetteurs. Ici, parmi tous les émetteurs existants, seuls les radiateurs sont pris en compte. Ainsi, les 3 contrôles de débit les plus courants ont été sélectionnés. Deux technologies de vannes sont utilisées, les vannes à 3 voies (V3V) et les vannes à 2 voies (V2V) comme montré Figure 7. Aujourd'hui, la norme est d'utiliser le V2V, car cela est censé être plus efficace. Cependant, dans les bâtiments anciens et quelques bâtiments neufs, les V3V sont encore utilisés car il est plus facile d'obtenir un équilibre hydraulique qu'avec des V2V. Les V3V peuvent être gérés de deux manières : soit en régulant le débit dans les radiateurs en bypassant une partie de débit entrant (contrôle du débit, répartition), soit en mélangeant une partie du débit de sortie avec l'entrée (contrôle de température, mélange). Habituellement, sur les systèmes secondaires, les V3V sont utilisées en contrôle du débit. Les V3V en contrôle de température sont principalement utilisés avec un échangeur alimentant l'ECS dans une configuration a un seul échangeur (voir Figure 6).

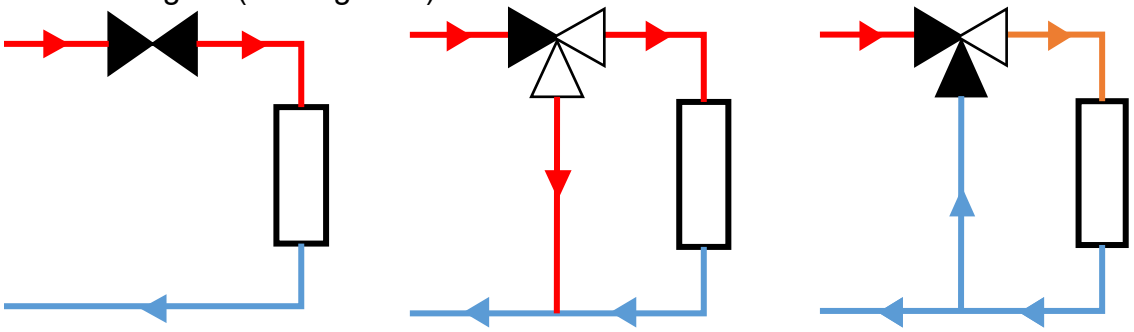


Figure 7 Vanne de régulation secondaire : vanne deux voies, vanne trois voies en contrôle de débit et vanne trois voies en contrôle de température [4]

De plus, le contrôle du débit secondaire pour le chauffage dépend non seulement de la vanne mais aussi de la technologie de la pompe. Trois technologies de pompe sont largement utilisées : une pompe à débit constant, une pompe à débit variable et une pompe à vitesse variable. Les différentes caractéristiques de chaque technologie sont présentées Figure 8. Habituellement, une pompe à vitesse variable n'est pas utilisée sur le réseau secondaire, mais elle est habituellement utilisée pour le réseau primaire. Par conséquent, seules les pompes à débit constant et à débit variable seront présentées dans les sections suivantes.

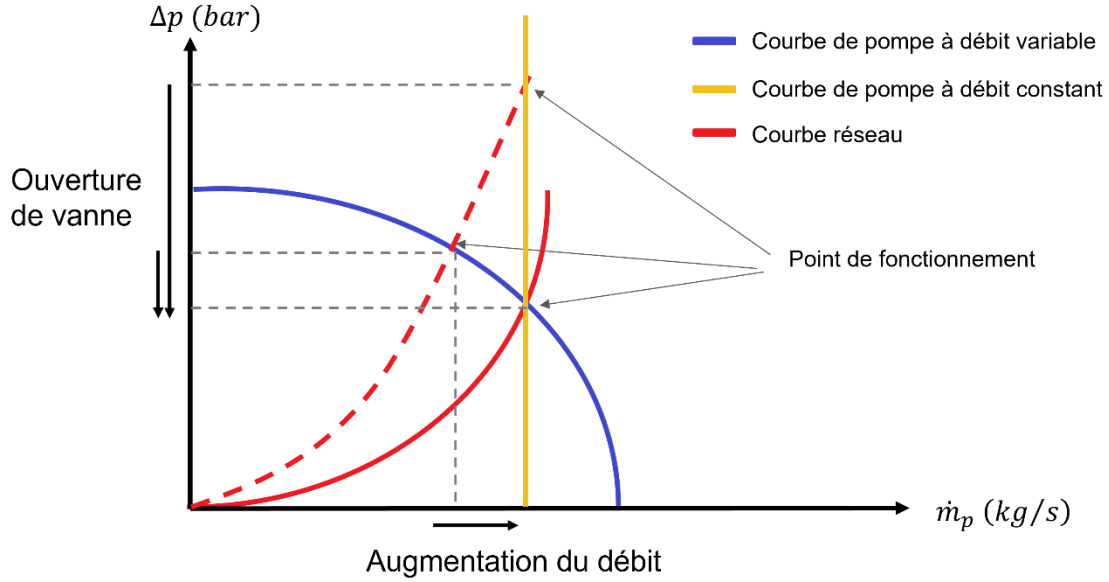


Figure 8 Caractéristiques de la pompe et du réseau [4]

Les vannes et la pompe doivent être considérées ensemble. En effet, le choix de la vanne dépend du régime de débit entraîné par la pompe. Par exemple, dans notre cas, une pompe à débit constant ne peut pas être utilisée avec des V2V car le trop-plein délivré par la pompe ne peut être géré sans un bypass. Ainsi, trois types de contrôle du débit secondaire sont pris en compte : la combinaison entre pompe à débit constant et V3V, et la combinaison entre pompe à débit variable et V3V ou V2V.

- Le régime de température du radiateur

Comme montré dans le module 2, différents régimes de température pour radiateurs sont utilisés. Les radiateurs sont conçus pour fournir une certaine puissance thermique selon certaines températures d'entrée et de sortie à la température extérieure de dimensionnement (c'est-à-dire -7°C dans le nord de la France). Il a été choisi de comparer deux régimes de température de radiateur largement utilisés : régime de température élevée de 80/60°C (HT) et régime de température basse de 55/45°C (BT).

- Architecture alimentation ECS

Comme montré précédemment (voir module 2), pour alimenter en ECS, plusieurs méthodes sont largement utilisées et surtout la présence, ou non, d'un ballon. Par conséquent, la première architecture courante est l'architecture instantanée (voir Figure 9) où le réseau secondaire ECS est directement connecté à l'échangeur de la sous-station sans ballon. Dans ce cas, le débit primaire est contrôlé pour atteindre la température de consigne secondaire départ égale à 60°C. Les débits d'eau froide et de recirculation sont mélangés et entrent directement dans l'entrée côté secondaire de l'échangeur.

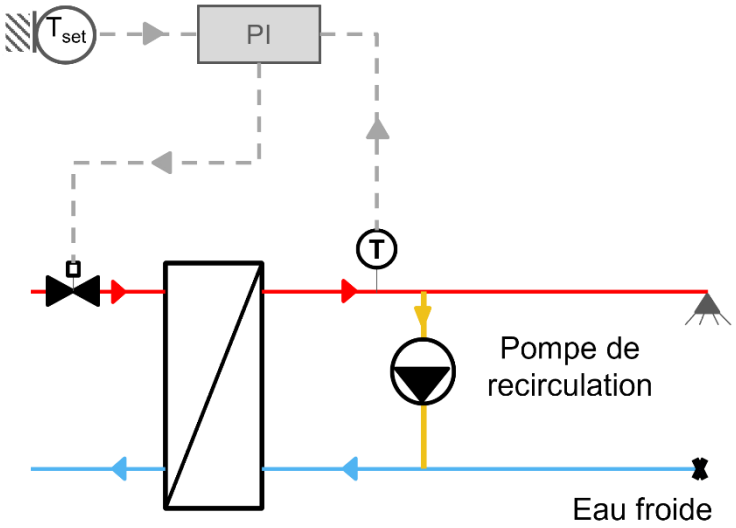


Figure 9 Sous-station alimentant ECS, architecture instantanée [4]

La deuxième conception courante est l'architecture avec ballon, où un ballon est placé entre l'échangeur de la sous-station et les points sous-titrage de dessin (voir Figure 10). Dans cette configuration, le débit primaire est contrôlé pour garantir une température supérieure à 60°C dans le ballon. Lors d'une demande d'ECS, l'eau froide arrive directement au fond du ballon et est mélangée à l'eau chaude, tandis que l'eau chaude est puisée par le client depuis le haut.

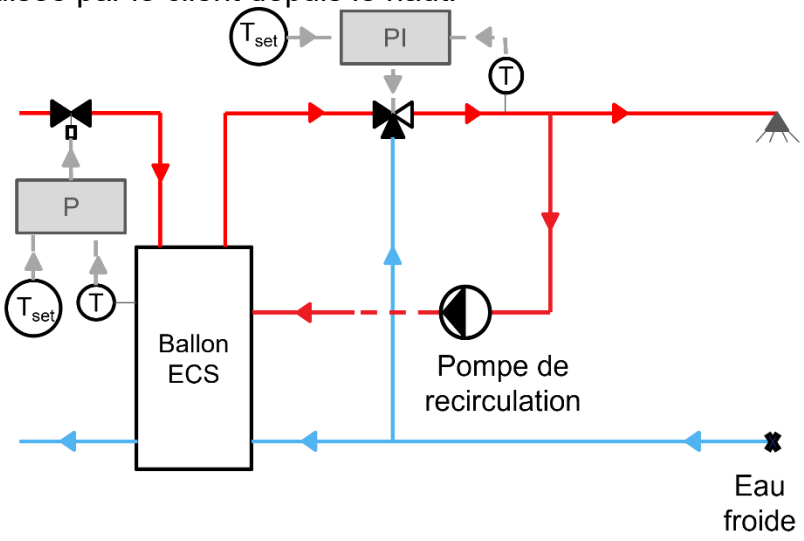


Figure 10 Sous-station alimentant ECS, architecture de réservoir de stockage [4]

En plus de la configuration précédente, une troisième architecture appelée ballon ECS bypassé est présentée. Cette configuration est un compromis entre les deux autres. L'objectif est d'éviter les retours chauds du côté secondaire de l'échangeur thermique. Pour cela, lorsqu'il n'y a pas de demande de ECS, le débit de recirculation doit être détourné. Comme la température de recirculation est d'au moins 55°C, un capteur est placé juste après le mélange de l'eau froide et de la recirculation. Si la température mesurée par le capteur dépasse 55°C, les vannes ferment l'accès à l'échangeur et le débit entre dans le ballon. Ainsi, le ballon est principalement utilisé pour garantir une température suffisante pour la recirculation. Lorsqu'il y a besoin d'ECS, le mélange d'eau froide et de recirculation ne traverse pas le ballon et va directement à l'échangeur de chaleur. En effet, l'idée est de ne chauffer que le ballon et d'éviter de consommer de l'eau chaude du ballon pendant une demande ou qu'aucun besoin d'ECS n'est

nécessaire pour alimenter la conduite de recirculation, ainsi éviter de connecter la conduite de recirculation chaude à l'échangeur de la sous-station et ainsi réduire la température retour coté primaire de la sous-station (voir Figure 11).

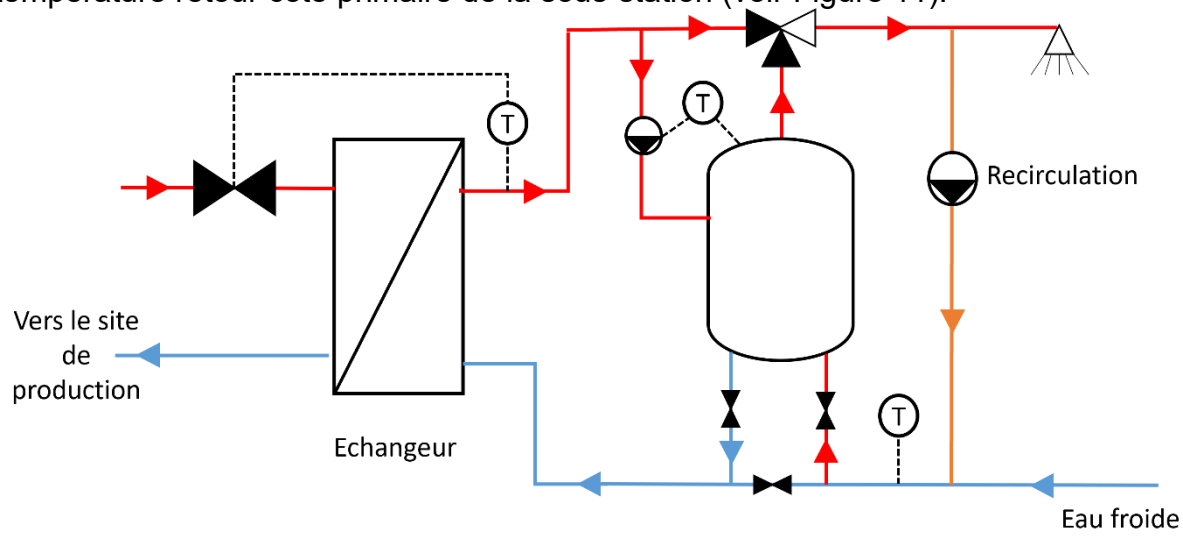


Figure 11 Sous-station fournissant de l'ECS, configuration ballon bypassé [4]

Enfin, en combinant toutes ces différentes actions de rénovation, 36 cas sont possibles. Ensuite, toutes ces combinaisons sont analysées et comparées.

- Impact du type d'émetteurs et du contrôle du débit secondaire

La comparaison de toutes les combinaisons pour une architecture à un échangeur, c'est-à-dire 18 cas, est présentée ici. Figure 12 présente la différence moyenne de température primaire de chaque cas étudié.

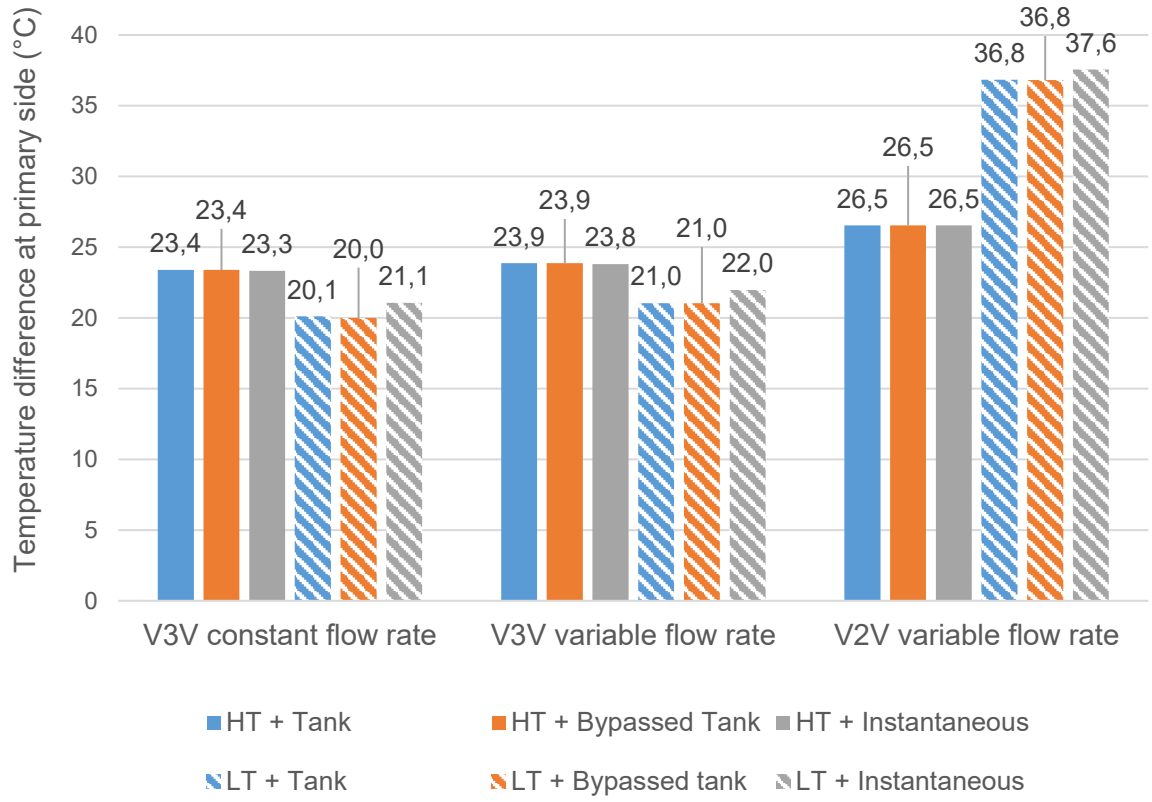


Figure 12 Comparaison des différences de température primaire pour toutes les configurations hydrauliques dans le cas d'une sous-station de chaleur globale [4]

Selon ces résultats, la stratégie de contrôle utilisant une pompe secondaire à débit variable couplée à une V2V offre de meilleures performances comparées aux deux autres types de contrôle, notamment avec des radiateurs BT. En effet, l'augmentation de la différence de température varie de 3,1°C à 16°C. En fait, avec les V3V et une pompe à débit constant, le débit fourni par la pompe est ajusté pour couvrir la demande maximale de chauffage. Ainsi, lorsque la demande est éloignée du maximum, le débit massique requis par les radiateurs est nettement inférieur au débit de la pompe. En conséquence, une grande partie du débit est bypassé par les V3V (voir Figure 13) et est mélangée au débit refroidi par le radiateur. Par conséquent, la température de retour secondaire est assez élevée et la température de retour primaire ne peut donc pas être significativement abaissée. Au contraire, avec une pompe à débit variable et une V2V, le débit est constamment ajusté à la demande de chauffage dans le radiateur et la température de retour secondaire est donc beaucoup plus basse, donc la température de retour primaire. De la même manière, les performances de la pompe à débit variable et du contrôle V3V sont inférieures à celles du contrôle V2V. Cependant, dans ce cas, le débit délivré par la pompe n'est pas toujours égal au débit maximal nécessaire. Par conséquent, comparé à la pompe à débit constant et au contrôle V3V, un débit légèrement inférieur est bypassé et la température de retour primaire est donc plus basse.

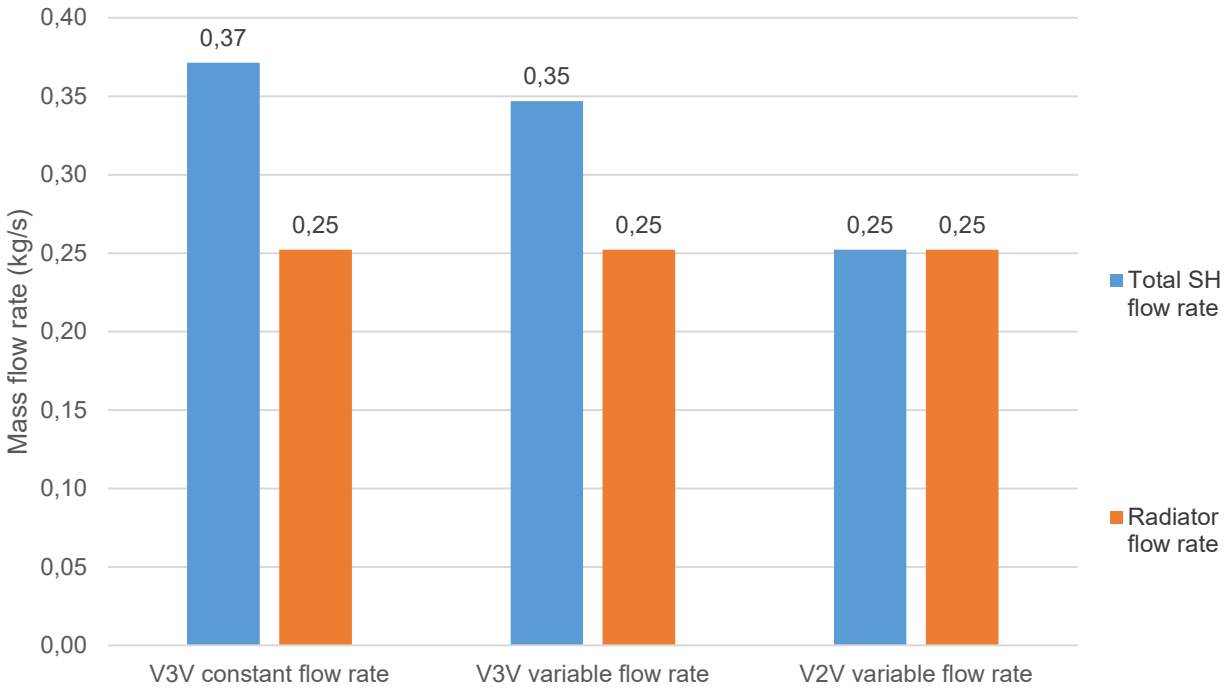


Figure 13 Comparaison entre le débit massique passant par les radiateurs et par l'entrée de vanne [4]

Le choix du type de radiateur peut avoir un impact majeur sur les performances. Deux cas peuvent être distingués. Le premier cas est lorsque des V3V sont utilisés (soit avec des pompes à débit constant ou pompe à débit variable). Même si cela peut sembler surprenant, la température moyenne de retour primaire est plus élevée avec les radiateurs BT qu'avec les radiateurs HT. Cela peut s'expliquer par les lois d'eau respectives des radiateurs. En effet, la loi sur l'eau du radiateur HT varie entre 80°C et 60°C, tandis que celle du radiateur BT est maintenue constante à 60°C quelle que soit la température extérieure en raison de la contrainte de température sur la température d'alimentation ECS (Figure 14).

Le choix du type de radiateur peut avoir un impact majeur sur les performances. Deux cas peuvent être distingués. Le premier cas est lorsque des V3V sont utilisés (soit avec une pompe à débit constant, soit à débit variable). Dans ce cas, le débit total utilisé pour le chauffage est légèrement inférieur avec les radiateurs BT qu'avec les radiateurs HT. De plus, la température départ secondaire diffère légèrement : lorsque les radiateurs HT sont utilisés, la température varie de 80°C à 60°C (selon la température extérieure), tandis que lorsque les radiateurs BT sont utilisés dans notre étude de cas avec une température constante de 60°C en raison de la contrainte sur l'alimentation thermique pour ECS (voir Figure 14**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**).

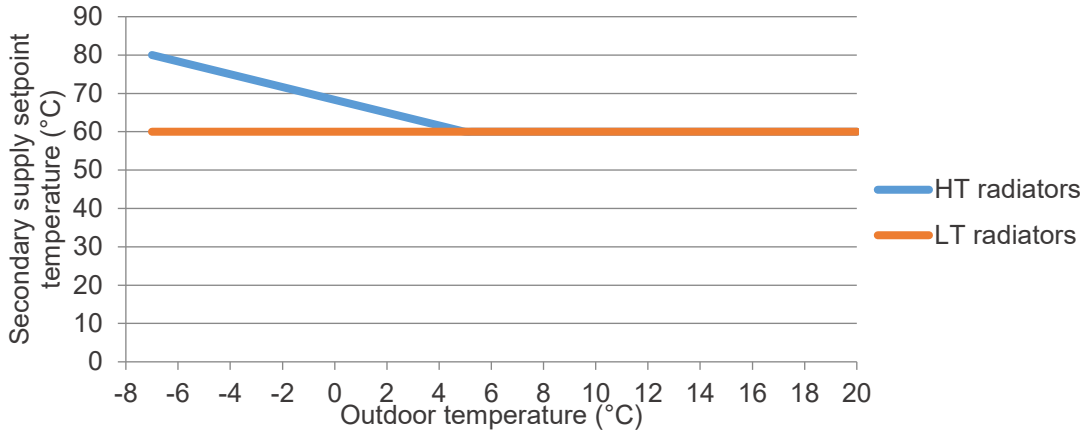


Figure 14 Contrôle de réinitialisation de la température de l'alimentation secondaire [4]

De plus, la différence de température nominale dans les radiateurs BT est de 10°C contre 20°C pour les radiateurs HT. Par conséquent, comme on peut le voir dans Figure 15, la différence de température entre l'entrée et la sortie dans les radiateurs BT est beaucoup plus faible que dans les radiateurs HT. Lorsque la température extérieure dépasse 6°C, la température de retour au secondaire est donc plus basse avec un radiateur HT qu'avec un radiateur BT.

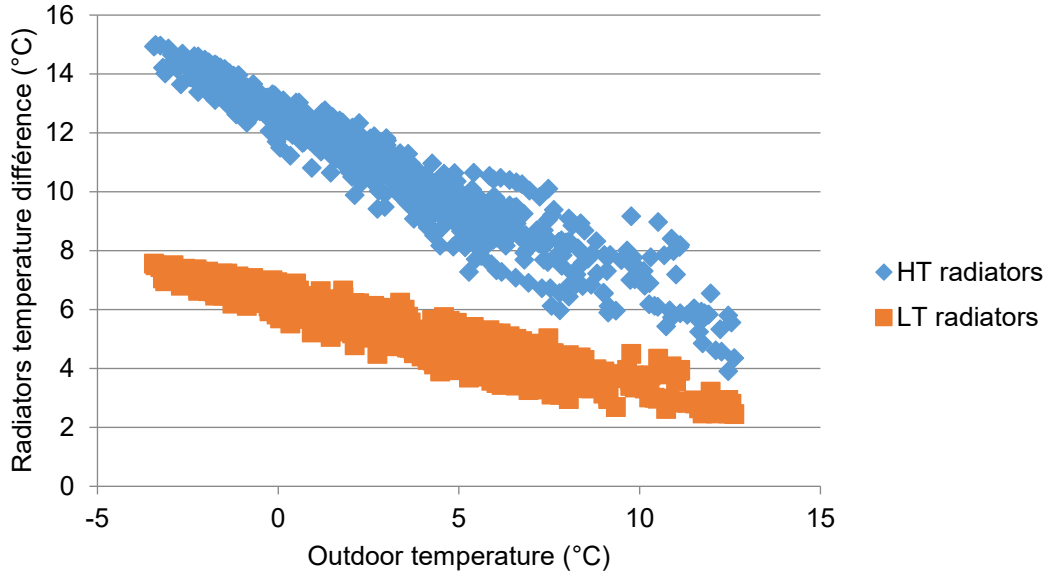


Figure 15 Évolution de la différence de température du radiateur après la température extérieure [4]

Ainsi, pour la même température d'alimentation et la même chaleur échangée, la température de retour est plus élevée lorsque des radiateurs BT sont utilisés.

Le second cas concerne l'utilisation d'une stratégie de commande V2V, dans laquelle il n'y a pas de flux de dérivation. En conséquence, la température de retour secondaire est plus basse avec les radiateurs BT qu'avec les radiateurs HT.

L'analyse suivante porte sur la comparaison entre toutes les combinaisons pour une sous-station montée en parallèle. Le Figure 16 présente les différences moyennes de température primaire de chaque cas étudié.

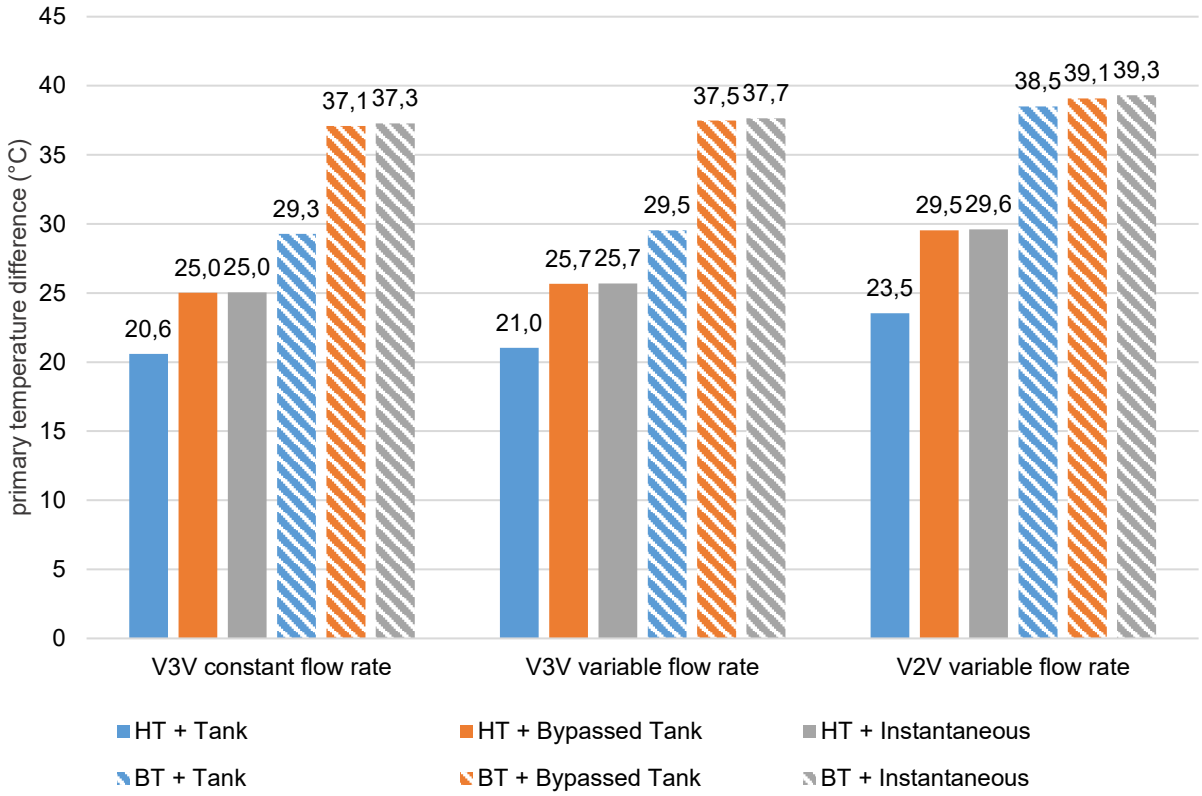


Figure 16 Comparaison des différences de température primaire pour toutes les configurations hydrauliques dans le cas d'une sous-station parallèle [4]

Concernant l'impact de la stratégie de contrôle, l'analyse est la même que celle expliquée dans la partie précédente. Le choix d'une stratégie de contrôle avec une pompe à débit variable et un V2V permet d'obtenir les meilleures performances, les gains par rapport aux deux autres solutions variant de 2°C à 9,2 °C.

Ensuite, l'utilisation de radiateurs BT permet d'augmenter la différence de température du côté primaire. En effet, un radiateur BT implique une différence de température ΔT de température de retour et départ plus faible du côté secondaire qu'un radiateur HT. Cela entraîne un débit plus élevé du côté secondaire, comme montré sur Figure 17 (pour la même puissance échangée). Par conséquent, pour les mêmes caractéristiques d'échangeur, le débit primaire est plus faible lorsque des radiateurs BT sont utilisés. Ainsi, la température de retour primaire est plus basse pour une température aller primaire similaire.

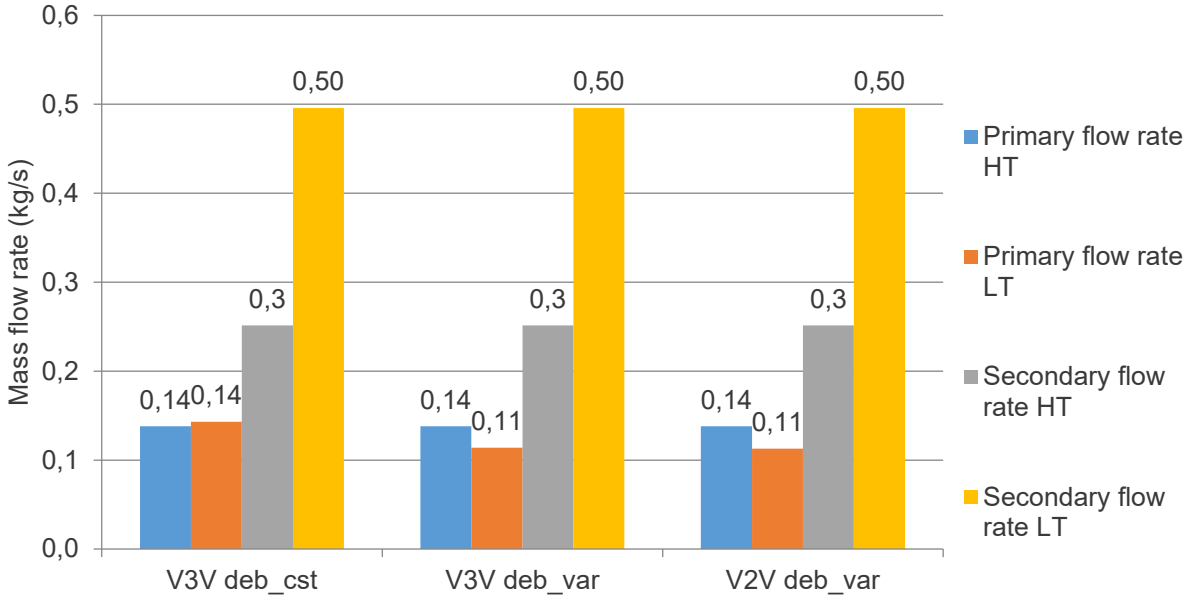


Figure 17 Comparaison des débits massiques primaires et secondaires entre tous les contrôles de radiateur dans le cas d'une sous-station parallèle [4]

Le point suivant est la comparaison entre les deux architectures de sous-stations. Quel que soit le type de radiateurs utilisé, l'architecture parallèle est bien meilleure. En effet, dans ce cas, l'alimentation en ECS et chauffage dépend de deux échangeurs distincts. Par conséquent, pour fournir du chauffage, la température départ secondaire peut être inférieure à 60°C. En conséquence, le débit secondaire peut être supérieur au débit primaire, ce qui réduit la température de retour primaire.

- Impact de la configuration hydraulique ECS

Selon les bâtiments, l'impact de l'architecture d'alimentation ECS est différent car le poids de la consommation ECS sur la consommation totale n'est pas le même. En effet, l'ECS représente respectivement 10 % et 30 % de la consommation pour les bâtiments anciens et les bâtiments résidentiels rénovés. Concernant les bâtiments anciens, si une architecture à un seul échangeur est utilisée, le choix de l'architecture d'alimentation ECS n'a aucun impact sur la performance globale. De plus, si une sous-station parallèle est utilisée, l'architecture avec ballon présente les pires performances. En effet, avec le ballon, l'entrée de l'échangeur du côté secondaire n'est pas directement reliée à l'alimentation en eau froide, contrairement aux deux autres architectures. Ainsi, la température de retour secondaire est proche de 55°C, c'est-à-dire la limite inférieure de température du ballon tandis que dans les autres configurations, la température est souvent proche de celle du réseau d'eau froide (voir Figure 18).

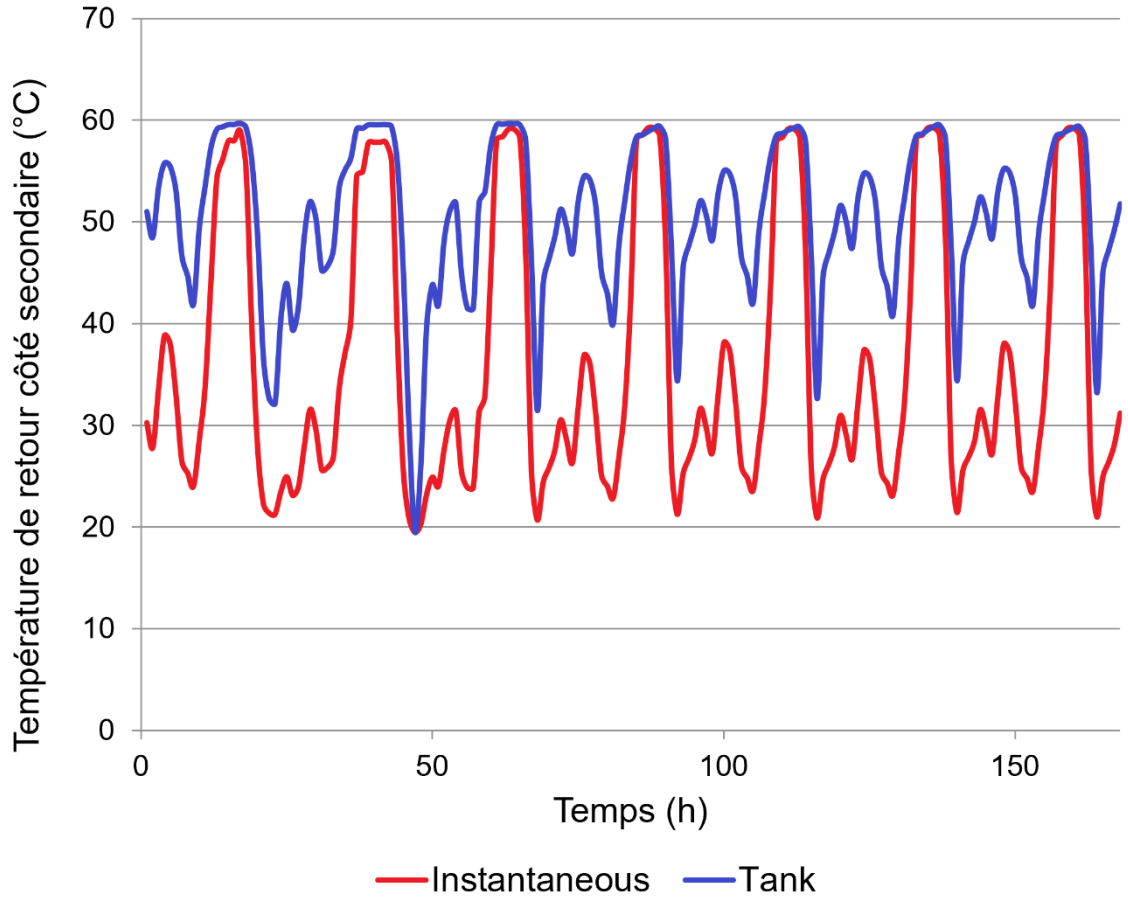


Figure 18 Évolution temporelle de la température de retour pour toute l'architecture d'alimentation ECS [4]

Concernant les bâtiments rénovés, l'analyse reste la même. Cependant, le gain sur la température primaire globale de retour dû à une architecture d'alimentation ECS plus adaptée est plus élevé puisque la consommation ECS représente une part plus importante de la consommation totale.

- Conclusion sur la meilleure configuration hydraulique

Pour conclure, tous les résultats sont résumés dans un arbre de décision (voir Figure 19, Figure 20 & Figure 21). Celle-ci est divisée en quatre couches représentant les 4 types d'actions de rénovation. Sur chaque couche, plusieurs options sont possibles. La ou les meilleures options sont représentées par une ligne verte tandis que les pires options sont représentées par une ligne rouge. Les meilleures options sont celles qui permettent de baisser le plus la température de retour de la sous-station du côté primaire. Les flèches pointillées noires représentent les gains (sur la température de retour) que l'on peut obtenir en passant d'une combinaison à une autre.

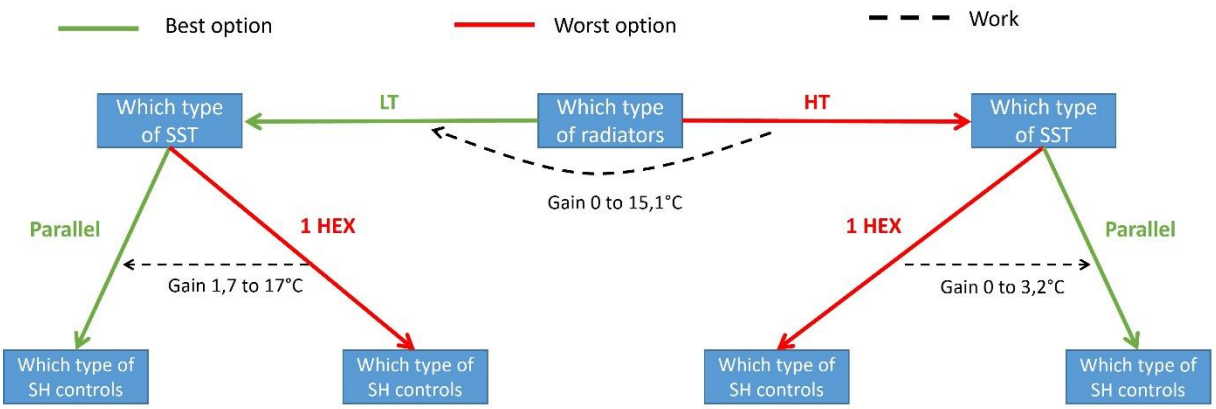


Figure 19 Arbre de décision résumant les résultats numériques partie 1 [4]

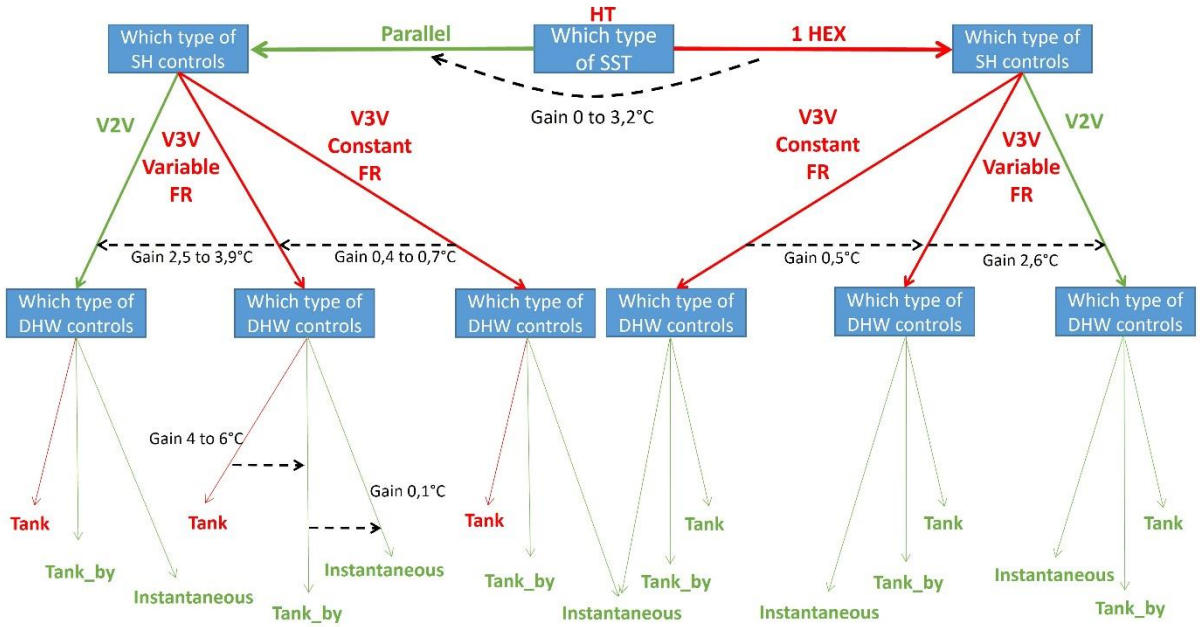


Figure 20 Arbre de décision résumant les résultats numériques dans le cas des radiateurs HT [4]

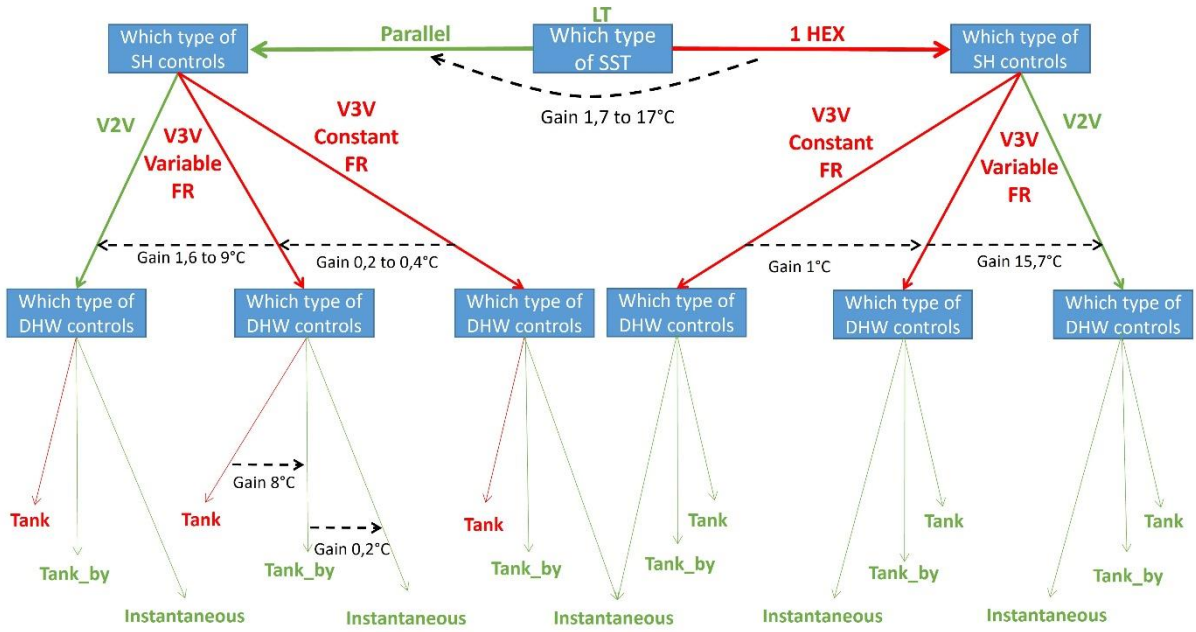


Figure 21 Arbre de décision résumant les résultats numériques dans le cas des radiateurs BT [4]

- Modèles de tarification de la chaleur

D'après les résultats, la baisse de la température de retour due aux actions de rénovation se traduisent par des gains d'énergie pour le RDC. Cela, ainsi que le coût des actions de rénovation, nous a permis d'évaluer les temps de retour sur investissement d'une action (ou d'une combinaison d'actions) et les économies financières résultant de réduction de l'utilisation du gaz par rapport à une source renouvelable basse température que permet l'action. Dans le Figure 22, le temps de retour sur investissement pour la meilleure combinaison d'actions est visualisé pour une, deux, trois et quatre actions. Comme l'indiquent les résultats, une situation avec un niveau élevé des prix du gaz naturel conduit à un temps de retour sur investissement significativement plus court pour les actions, allant de 0,9 à 1,3 an, tandis que les prix du gaz à des niveaux plus bas donnent des temps de retour sur investissement d'environ 6 à 9 ans. En supposant que les économies soient entièrement reportées sur la facture du client, toutes ces combinaisons d'actions pourraient être considérées comme de bonnes opportunités d'investissement.

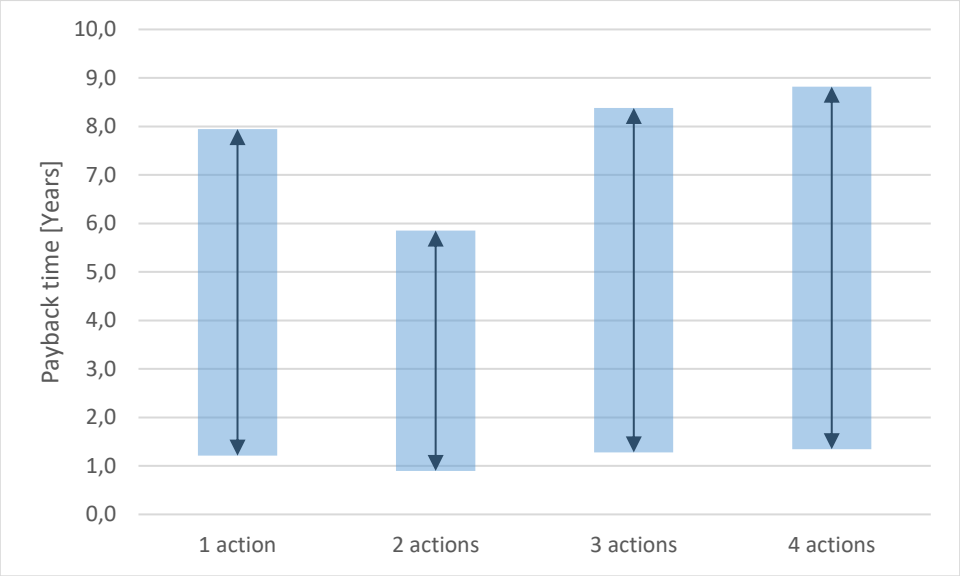


Figure 22 Temps de retour sur investissement pour la meilleure combinaison d'actions pour un prix du gaz bas (20 EUR/MWh) et élevé (130 EUR/MWh). Les actions représentées sont 2V (pour 1 action), 2V+BT (pour 2 actions), 2V+BT+parallèle (pour 3 actions) et 2V+BT+parallèle+instantané (pour 4 actions) [4]

La question posée est de savoir comment aider les clients à réaménager leurs systèmes de chauffage pour améliorer les performances du réseau. En effet, les opérateurs des RDC n'ont pas le contrôle ni la connaissance des systèmes hydrauliques coté bâtiment. Une action de rénovation des système hydrauliques du bâtiment ne modifiera pas la consommation de chaleur des clients mais contribuera à augmenter l'utilisation des énergies renouvelables sur l'ensemble du réseau. Par conséquent, les clients n'ont qu'un intérêt indirect à moderniser leurs systèmes.

Des incitations financières ont été étudiés comme solution pour encourager les propriétaires de bâtiments à moderniser leurs systèmes à faible efficacité. En général, le tarif est divisé en deux composantes : l'abonnement correspondant à un tarif fixe dépendant de la puissance maximale de la sous-station et un tarif variable correspondant au coût de la consommation d'énergie

À partir d'une revue de littérature, certaines recommandations ont été formulées. Un bon modèle de prix des réseaux de chaleur du point de vue du client a été décrit comme facile à comprendre et « équitable ». De plus, il est essentiel d'engager un dialogue étroit avec les clients pour expliquer comment les tarifs incitatifs peuvent générer une solution gagnant-gagnant pour le client et l'opérateur du réseau.

Les facteurs les plus importants à considérer pour les tarifs incitatifs basés sur les pratiques tarifaires incitatives dans des marchés matures identifiées dans la littérature sont résumés dans le tableau 1.

Tableau 1. Résumé des tarifs incitatifs en usage et des composantes mesurées [4]

Tarif en vigueur	**Composante mesurée**
Volume/Bonus-Malus	m3/MWh
Bonus-Malus	La température de retour peut inclure une mesure distincte des performances de refroidissement via la sous-station
Réduction	Clients utilisant la chaleur en cascade

Rémunération	Tarif pour les livraisons de chaleur résiduelle

Les modèles proposés de tarification de la chaleur s'appuient sur la structure tarifaire classique et introduisent des éléments supplémentaires, tels que la tarification basée sur la consommation de volume d'eau par énergie consommée, un tarif incitatif pour la réduction des températures de retour primaires, et une récompense pour l'utilisation de la chaleur retour d'autre sous-station. Les incitations existantes provenant des marchés matures devraient être maintenues, telles que les frais basés sur les débits et les frais liés à la capacité installée, tandis que de nouveaux facteurs — tels que la baisse des températures des sous-stations et l'utilisation de la chaleur retour d'autre sous-station — devraient être intégrés dans les futurs modèles de tarification.
Une fois que le côté secondaire utilise le bon équipement, l'étape suivante consiste à se concentrer sur la détection des dysfonctionnements pour un bon fonctionnement du RDC.

- Détection des défauts

La détection des causes des dysfonctionnements dans un réseau de chauffage constitue un défi majeur pour les opérateurs et gestionnaires de ces infrastructures. Les réseaux de chauffage, en tant que systèmes thermiques complexes et étendus, sont soumis à de nombreuses incertitudes liées aux conditions de fonctionnement, à la variabilité des charges thermiques, à l'état des équipements et à l'interaction entre les sous-stations et le réseau principal. La littérature scientifique souligne que ces systèmes se caractérisent par un fort couplage hydraulique et thermique, ce qui rend difficile l'analyse indépendante de chaque composant [6] & [3] .

- Défis de la détection de dysfonctionnement

Les perturbations observées, telles que des chutes de température, des pertes de pression ou une consommation excessive d'énergie, peuvent résulter de nombreuses causes : fuites, blocage de vannes, mauvais équilibrage hydraulique, capteurs défectueux ou même des erreurs de contrôle. Cependant, ces symptômes peuvent être similaires quelle que soit la cause réelle, rendant l'identification précise de la source du dysfonctionnement particulièrement complexe. De plus, l'absence ou la faible résolution de données en temps réel dans certains réseaux anciens limitent encore les capacités de diagnostic automatisées. De plus, chaque réseau de chaleur possède une configuration spécifique, avec une large gamme d'équipements, de sous-stations, de profils de consommation et de technologies utilisés. Cette hétérogénéité rend difficile la standardisation des approches de détection de pannes et limite leur transférabilité d'un réseau à un autre [7].
Il devient donc nécessaire d'utiliser des approches hybrides combinant modélisation physique, analyse de données et techniques de machine learning pour améliorer la localisation et la compréhension des anomalies. Cependant, même ces approches innovantes dépendent de la qualité des données disponibles et de la connaissance détaillée du réseau étudié [8].

En effet, seules quelques données sont légalement obligatoires et généralement disponibles au niveau des sous-stations (voir Figure 23) :

- Températures aller et retour côté primaire
- Température départ secondaire
- Energie échangée dans la sous-station

- Débit primaire

Cependant, pour mieux comprendre le comportement de la sous-station, d'autres données sont indispensables, telles que la température de retour côté secondaire et le débit côté secondaire. De plus, la température de retour à chaque émetteur peut être très utile.

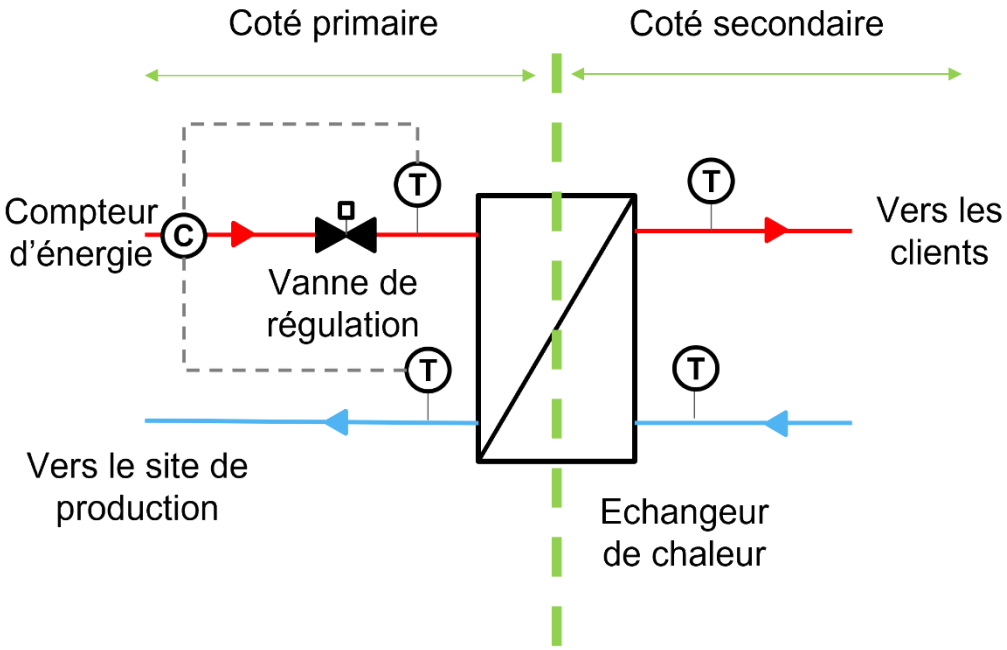


Figure 23 schéma de sous-station

- Qu'est-ce que la détection de dysfonctionnement ?

Qu'il s'agisse des outils utilisés par les opérateurs ou des outils proposés dans la littérature, deux tendances majeures émergent : la détection d'anomalies et la détection de défauts. La détection d'anomalie vise à trouver des motifs dans les données qui ne correspondent pas à une notion précédemment définie de comportement attendu et « normal ». Ce type de détection permet de détecter des valeurs aberrantes et des écarts dans les données mesurées, ainsi que des comportements atypiques et des schémas anormaux. Cependant, il n'est pas possible de déterminer directement l'origine de l'anomalie et donc de corriger le système. De plus, pour effectuer de la détection d'anomalie, un comportement normal doit être défini, ce qui peut être complexe. La deuxième tendance concerne la détection des défauts, qui vise à identifier les changements survenant dans le système qui implique fonctionnement non-correct. Ce type de détection permet de trouver la cause du dysfonctionnement et ainsi de la corriger. Cependant, il est plus difficile à réaliser.
La détection de dysfonctionnement, soit d'anomalie, soit de défaut, est effectuée par 5 méthodes [8] :

- Visualisation et analyse manuelle
- Seuils
- Régression
- Classification
- Regroupement

Chaque méthode peut être utilisée séparément ou en combinaison. Ces cinq méthodes sont détaillées et illustrées à l'aide d'outils utilisés pour la détection d'anomalies.

- Détection d'anomalie

- Visualisation et analyse manuelle

La visualisation et l'analyse manuelle sont les méthodes les plus simples et les plus anciennes pour détecter une anomalie. L'analyse manuelle implique que des experts humains examinent des mesures de sous-stations ou des indicateurs dérivés, souvent soutenus par des outils de visualisation. Cette approche offre une grande flexibilité grâce au jugement des experts, mais elle est intrinsèquement subjective. En pratique, l'analyse manuelle peut être utilisée pour détecter des anomalies et des défauts, ou pour mener une enquête plus approfondie sur des problèmes déjà identifiés par d'autres méthodes.
Par exemple, la méthode proposée par [1] cherche à comparer le comportement d'une sous-station de référence (considérée comme fonctionnant sans problème majeur) à d'autres. Ils ont proposé de comparer l'évolution de la puissance demandée selon la température extérieure et le débit moyen d'eau horaire sur la semaine selon les 4 saisons (voir Figure 24).

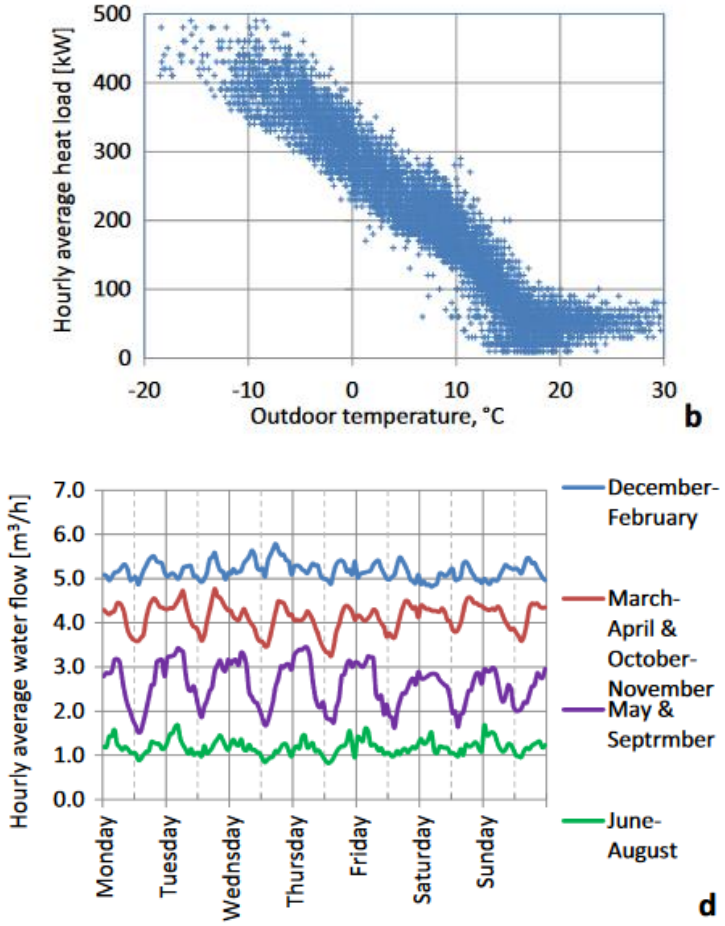


Figure 24 Comportement correct d'une sous-station [1]

La Puissance thermique moyenne horaire est censée être linéaire selon la température extérieure (sensibilité thermique du chauffage) et rester constante dès que la température extérieure est suffisamment élevée pour que le chauffage ne soit plus nécessaire. Le débit horaire moyen d'eau est censé être stable et plus élevé en saison froide.
Le Figure 25 Affiche les mêmes données mais pour une sous-station défectueuse. La puissance thermique moyenne horaire est moins linéaire que prévu et le débit d'eau est instable, soulignant un problème.

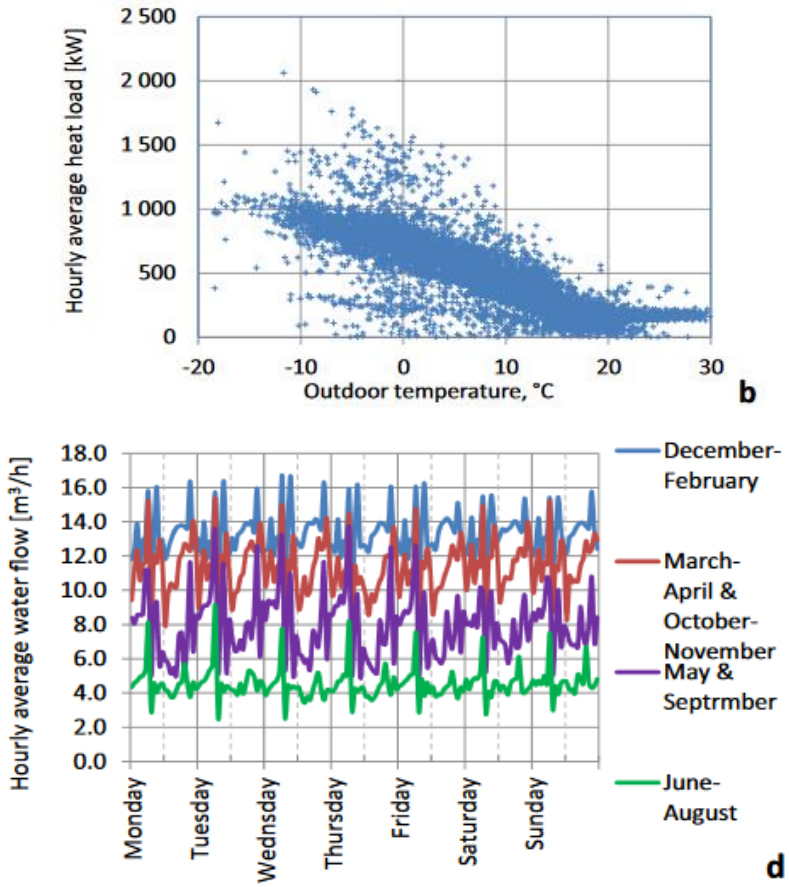


Figure 25 Comportement anormal d'une sous-station [1]

- Seuils

Les méthodes basées sur les seuils déterminent l'état opérationnel d'un système de chauffage urbain en comparant les mesures avec des limites prédéfinies. Ces seuils peuvent être fixés manuellement par des experts sur la base d'hypothèses concernant des taux d'erreur acceptables (c'est-à-dire une marge d'erreur de 5 %), ou ils peuvent être établis par analyse statistique, comme l'utilisation de trois écarts-types par rapport à la moyenne.

Par exemple, l'indicateur créé par [9] compare l'ouverture de la vanne de contrôle mesurée in situ à celle calculée par un modèle de machine learning sans dysfonctionnement (voir Figure 26).

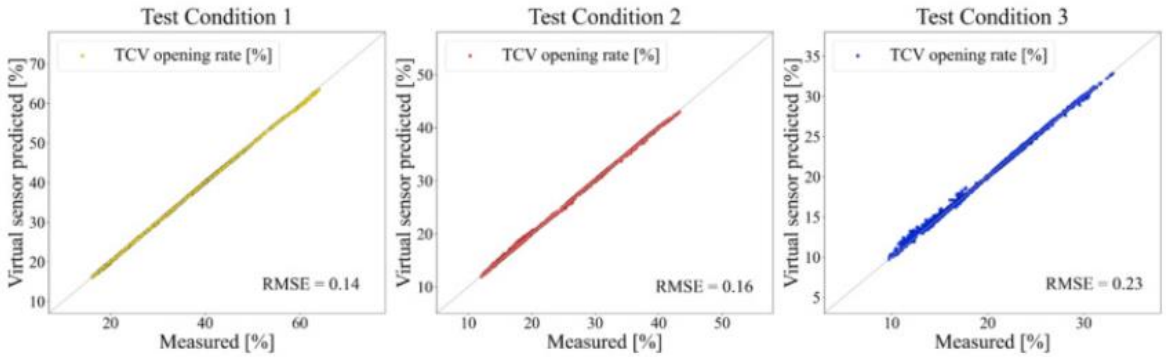


Figure 26 Corrélation entre l'ouverture de vanne mesurée et simulée [9]

Ensuite, le résidu normalisé est calculé entre les valeurs simulées et mesurées. Une anomalie est détectée lorsque le résidu est supérieur à 3 %, correspondant au taux de

fausse alerte (voir Figure 27). Cette méthode est utilisée pour détecter l'encrassement sur un échangeur de chaleur de sous-station.

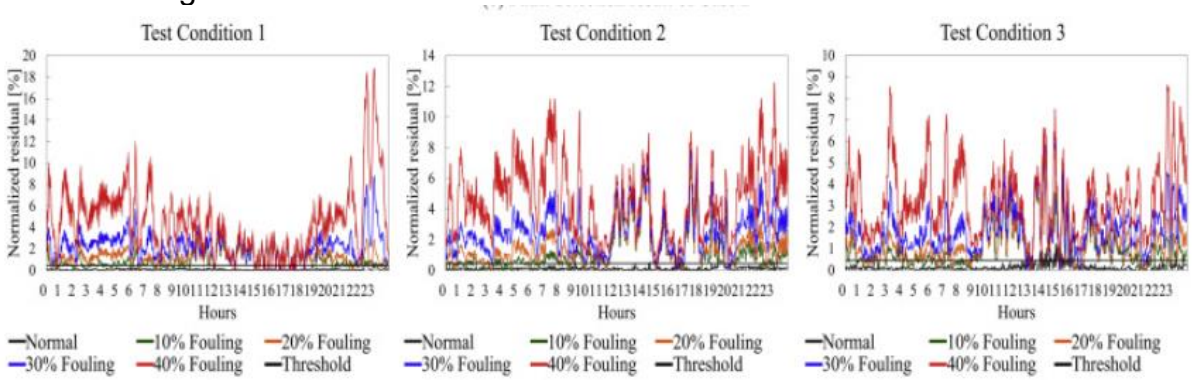


Figure 27 Résidu normalisé selon le temps et le taux d'encrassement [9]

Selon les résultats de [9], cet indicateur basé sur un seuil est capable de détecter l'encrassement, mais il n'avait pas été testé sur d'autres types de dysfonctionnements.

- Régression

La régression est une méthode utilisée pour estimer la relation entre une ou plusieurs variables indépendantes et une variable dépendante au sein d'un ensemble de données. En prenant les variables indépendantes en entrée, un modèle de régression génère une prédiction à valeurs réelles pour les variables dépendantes. Dans le contexte des RDC , la régression est couramment employée pour prévoir des variables spécifiques et évaluer l'écart entre les valeurs prédites et réellement mesurées.

Par exemple, l'indicateur défini par [10] vise à détecter l'encrassement dans un échangeur de chaleur de la sous-station. Pour un échangeur de chaleur, il existe une régression linéaire entre la puissance échangée $\dot{Q}$ (W) et le coefficient global de transfert de chaleur UA (W/K) :

$$UA = \frac{1}{LMTD} * \phi = \mathrm{a} * \phi$$

Avec $LMTD$ la différence de température moyenne logarithmique en K. L'encrassement d'un échangeur de chaleur modifie le UA et donc la pente de la régression linéaire (voir Figure 28).

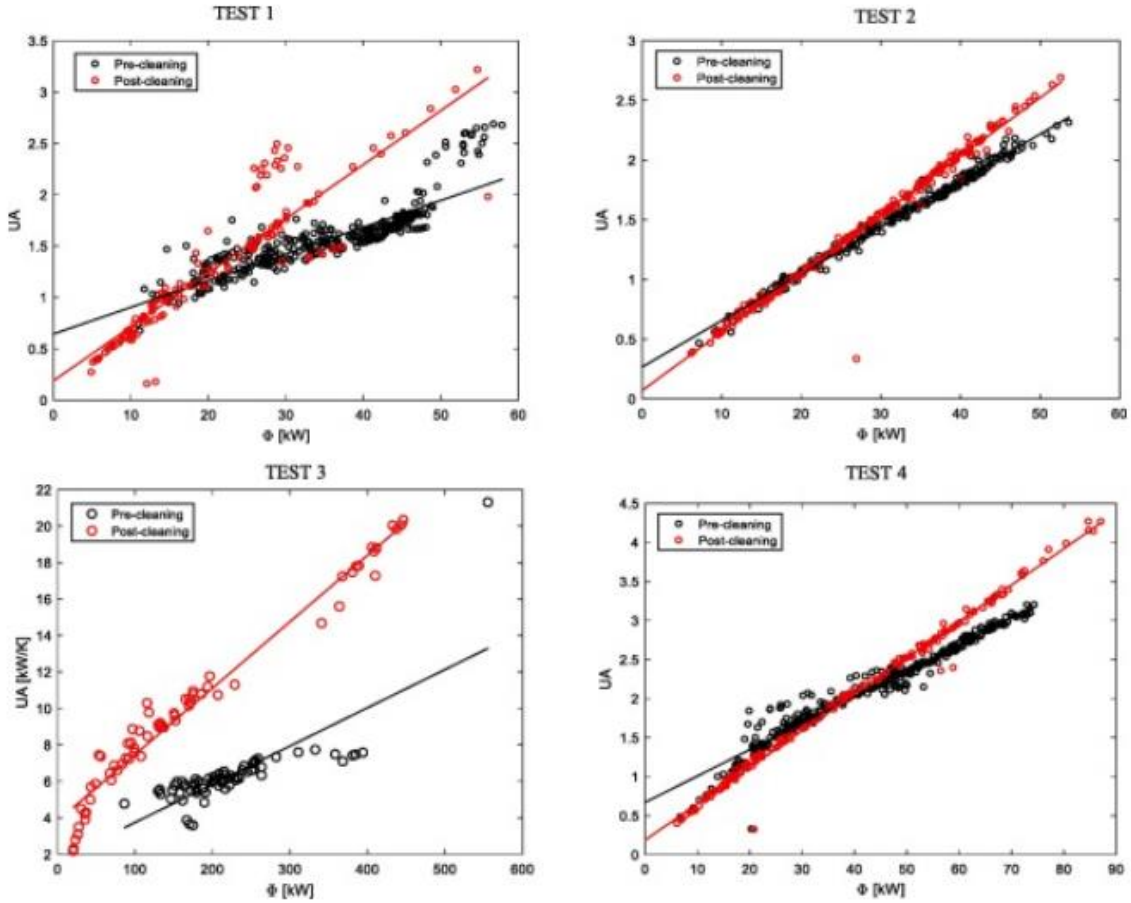


Figure 28 Régression linéaire entre le transfert de chaleur global et la puissance échangée contre un échangeur de chaleur avec et sans encrassement [10]

Pour améliorer l'indicateur, trois seuils sont définis sur la variation de pente afin d'estimer le niveau d'encrassement :

- Si la variation de pente est inférieure à 15 %, l'échangeur de chaleur est considéré comme propre
- Si la variation de pente est comprise entre 15 % et 25 %, l'échangeur de chaleur est considéré comme partiellement encombré
- Si la variation de pente est supérieure à 25 %, l'échangeur de chaleur est considéré comme encombré.

- Classification

La classification est une tâche de machine learning qui consiste à assigner une instance à l'une de plusieurs catégories prédéfinies. Bien que diverses techniques puissent servir cet objectif, cette catégorie désigne spécifiquement des méthodes utilisant des algorithmes de classification pour identifier directement si une erreur s'est produite et, le cas échéant, quel type. Contrairement aux modèles de régression qui produisent des sorties numériques continues, les classificateurs attribuent des entrées à des classes discrètes, généralement représentées par des étiquettes entières. Contrairement au clustering, qui fonctionne sur des données non étiquetées, la classification repose sur des exemples étiquetés de défauts connus pour l'entraînement. Les algorithmes de classification courants incluent les réseaux de neurones, les arbres de décision et les machines à vecteurs de support.

Par exemple, Zimmerman et al. [11] a utilisé un réseau bayésien pour décrire de manière probabiliste les relations de cause à effet de grandeurs connues pour la détection automatique des défauts. Ils ont utilisé cette méthode pour classifier l'évolution temporelle de la pression et du débit massique dans les canalisations. Selon cette évolution, l'algorithme classe le schéma entre comportement normal et comportement anormal dû à une fuite (voir Figure 29) ou une panne du capteur (voir Figure 30).

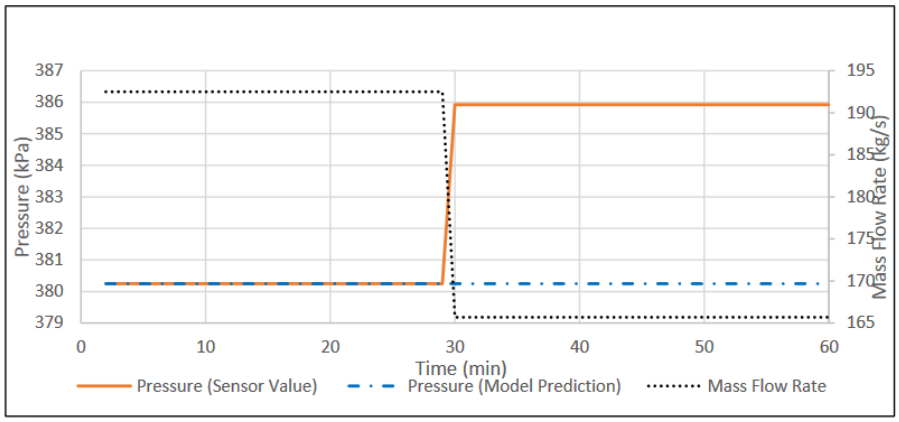


Figure 29 Évolution au fil du temps de la pression dans un tuyau avec ou sans fuite [11]

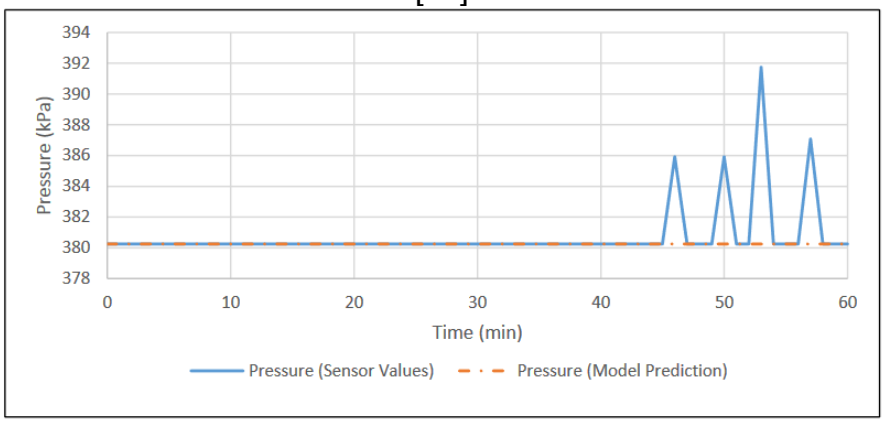


Figure 30 Évolution au fil du temps de la pression dans un tuyau avec ou sans défaut de capteur [11]

À ce stade, cette méthode peut détecter des défauts évidents et leurs causes, et elle semble prometteuse.

- Regroupement

En tant que classification, le clustering implique également l'attribution d'éléments à des groupes ou clusters, mais contrairement à la classification, il ne repose pas sur des données identifiées. Au lieu de cela, les algorithmes de regroupement regroupent les éléments en fonction de la similarité, garantissant que les éléments au sein d'un même cluster sont plus similaires que ceux de différents clusters. Cette approche non supervisée est souvent utilisée pour catégoriser les sous-stations en fonction des indicateurs de performance ou des schémas de consommation. Une fois les clusters formés, les valeurs aberrantes ou les groupes marginaux peuvent être détectés et examinés plus en détail.

Par exemple, selon [12], l'analyse par cluster peut identifier les schémas de fonctionnement saisonniers et quotidiens. Ils ont identifié différents schémas selon différentes stratégies de contrôle telles que (voir Figure 31):

- Une relation entre la différence de température primaire et la chaleur d'échange

- Une relation entre le débit massique secondaire et la chaleur échangée
- Une relation entre le débit massique secondaire et la différence de pression secondaire
- Une relation entre la chaleur échangée sur les côtés secondaire et primaire

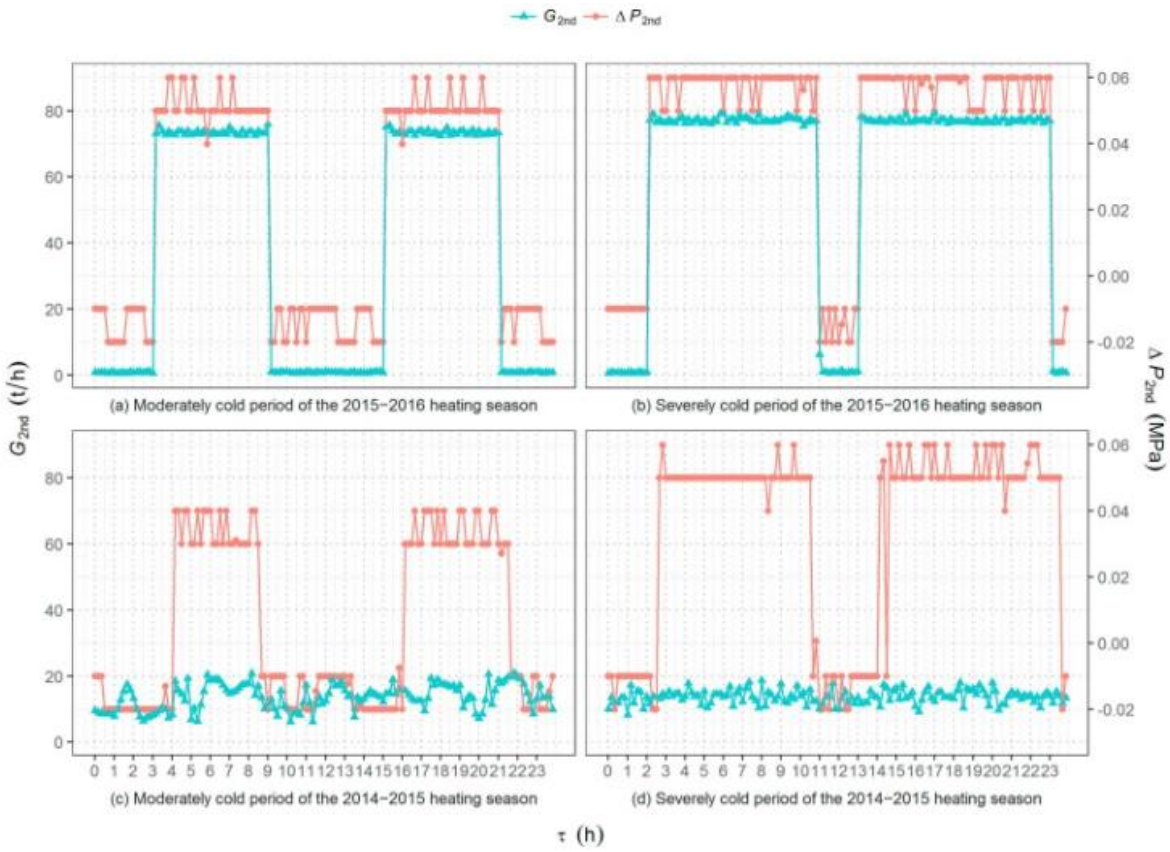


Figure 31 Définition du motif normal et du groupe [12]

Une anomalie est détectée lorsqu'un des motifs ne correspond pas à un cluster existant. À ce stade, cette méthode peut détecter une anomalie évidente, et elle semble prometteuse.

- Indicateurs courants utilisés par les opérateurs

Comme les dysfonctionnements peuvent causer des RDC sous-performant ou un inconfort pour le client, les opérateurs ont déjà mis en place des méthodes pour détecter les anomalies. Ils utilisaient généralement des méthodes simples basées sur la visualisation des données, la régression et les seuils. Ils vérifient les données mensuelles de facturation client pour détecter une consommation excessive, l'indice de qualité basé sur la performance de l'installation telle que le niveau de température de retour ou le débit massique de la sous-station. Quelques indicateurs simples sont proposés dans la littérature, tels que la méthode « excess flow » et la signature thermique.

La méthode « excess fow » [13] permet, à l'aide de mesures de différence de température au niveau primaire et de la consommation de chaque SST, d'établir un ordre de priorité pour l'inspection des sous-stations du réseau basé sur le calcul d'un volume d'eau en excès. En effet, une sous-station défaillante présente une différence de température au primaire inférieure à ce qui est attendu, ce qui entraîne une augmentation du volume d'eau consommé. Un volume d'eau idéal consommé par le SST est calculé à partir de la consommation annuelle de chaleur du SST et d'une

différence de température de référence. Ensuite, le volume d'eau consommé réellement est calculé à partir de la consommation annuelle de la sous-station et de la différence moyenne de température, puis les volumes d'eau réels et idéaux sont comparés pour déterminer le volume excédentaire. Ainsi, plus le volume excédentaire est grand, plus le SST dégrade la performance globale du réseau (voir Figure 32).

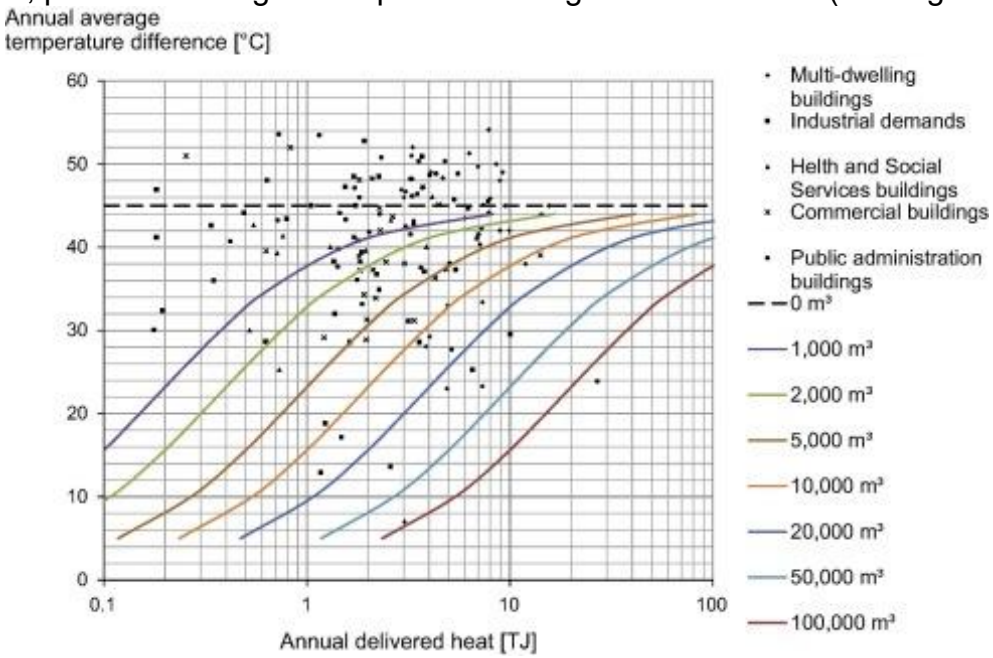


Figure 32 Indicateur de méthode de l'excès d'écoulement [13]

Cependant, cette méthode présente des limites : elle ne permet la maintenance corrective que parce que les données sont nécessaires sur une longue période. De plus, la détermination d'une baisse de température de référence rend la mise en œuvre de la méthode délicate. En effet, il est difficile de proposer la même référence pour tous les SST car ils ont des usages différents (chauffage à haute ou basse température, ECS) et des configurations qui influencent la chute maximale de température possible. Pour déterminer cette différence de température de référence, une simulation numérique peut être utilisée. La différence moyenne mesurée de température représentative du système est également discutable.
Afin d'obtenir une détection plus précise et plus rapide des dysfonctionnements, des indicateurs de maintenance prédictifs peuvent alors être envisagés, ce qui peut être réalisé par la méthode de la signature thermique [13]. En utilisant la mesure de la température extérieure et de la chute de température au primaire de chaque SST, la performance du SST est surveillée quotidiennement. Les mesures sont comparées à une référence correspondant au fonctionnement idéal de la SST. À partir de cette référence et des données historiques sur les SST, un seuil d'intervention est déterminé correspondant à ±3 fois l'écart-type entre la référence et les données historiques (voir Figure 33).

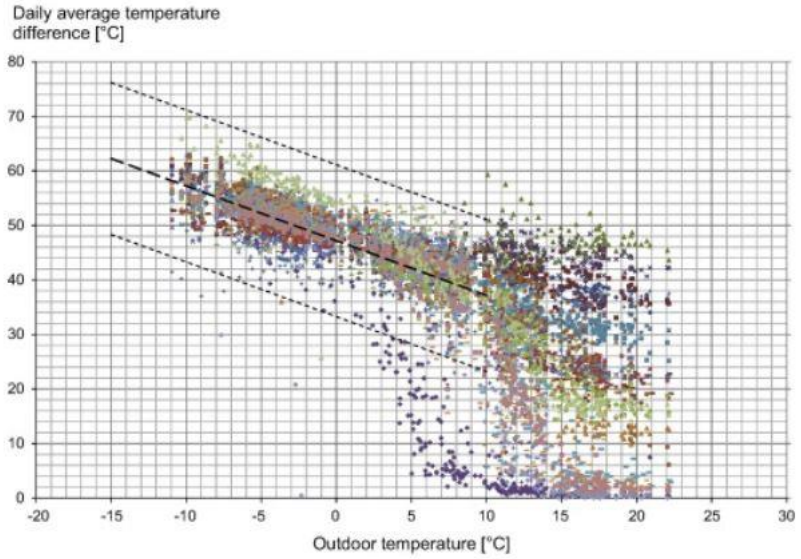


Figure 33 Indicateur de signature thermique [13]

Comme précédemment, cet indicateur nécessite l'établissement d'une référence pouvant être déterminée en simulant un réseau réel. De plus, cette méthode ne fonctionne pas pour des températures extérieures élevées comme montré sur Figure 33, car à partir du seuil de 10°C, la consommation d'énergie des réseaux provient principalement de l'ECS, qui n'est pas thermosensible. Ainsi, cette méthode ne peut être utilisée que sur les SST fournissant de la chaleur pour le chauffage. Cette méthode a été améliorée par [14] et [15] en utilisant l'énergie échangée ou le pincement de l'échangeur de chaleur au lieu de la différence de température primaire. L'utilisation de ces données permet d'étendre la méthode de signature thermique à la sous-station ECS. Pour obtenir un indicateur plus précis, Manson et al. [14] ont également proposé de créer une régression linéaire et un seuil par morceaux (voir Figure 34).

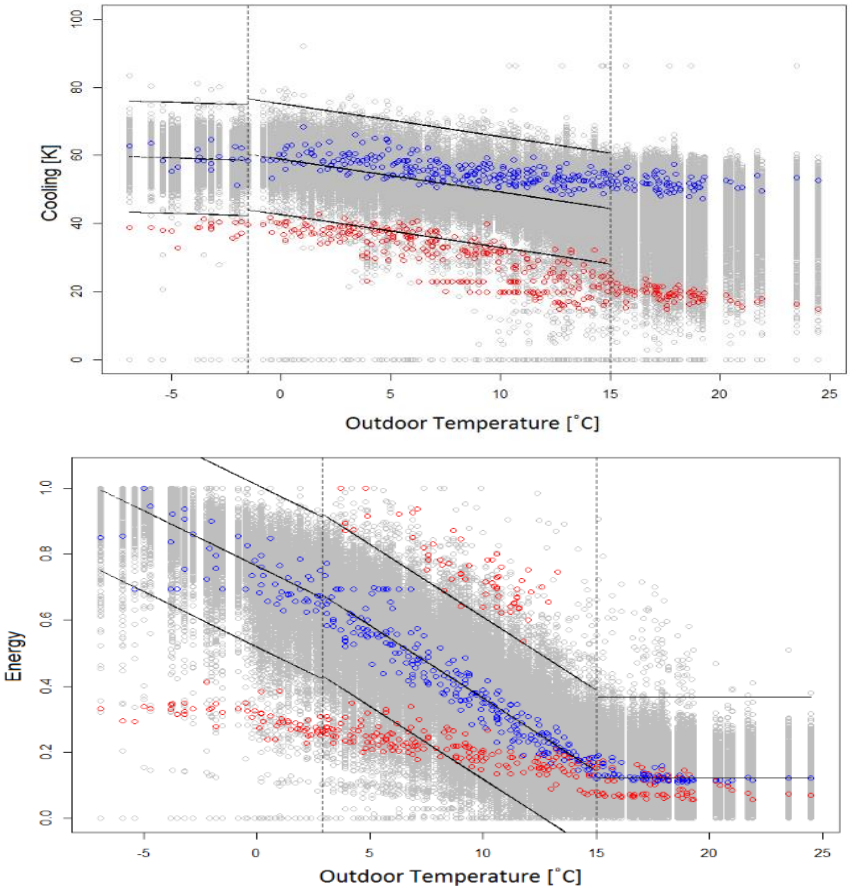


Figure 34 La méthode de la signature thermique est améliorée par (en bleu un comportement normal, en rouge un comportement anormal)[14]

La méthode de signature thermique a également été améliorée par [16] et [17] en ajoutant du clustering dans la méthode. En effet, [16] et [17] ont proposé de faire un clustering sur un motif de demande pour identifier différents types d'utilisateurs finaux et ainsi créer un seuil adaptatif.
Pour conclure, ces deux méthodes sont simples à utiliser, nécessitent peu de données et permettent une détection rapide, mais il n'y a toujours aucune indication sur l'origine de la panne.

- Détection des défauts

Fabre & al [4] ont proposé un indicateur pour détecter une vanne bloquée sur une position d'ouverture. Comme présenté à la Figure 35, lorsqu'une vanne est bloquée sur une position, le débit n'est plus contrôlé par la vanne de regulation et, pour tous les cas de dysfonctionnement (sauf l'ouverture de 10 %), le débit massique est la plupart du temps supérieur à ce qui est nécessaire. De plus, la figure souligne qu'une vanne bloquée implique une instabilité du débit passant par la vanne. C'est la signature spécifique d'une vanne bloquée. Ainsi, pour détecter une vanne de contrôle primaire bloquée, un indicateur basé sur cette signature spécifique a été développé.

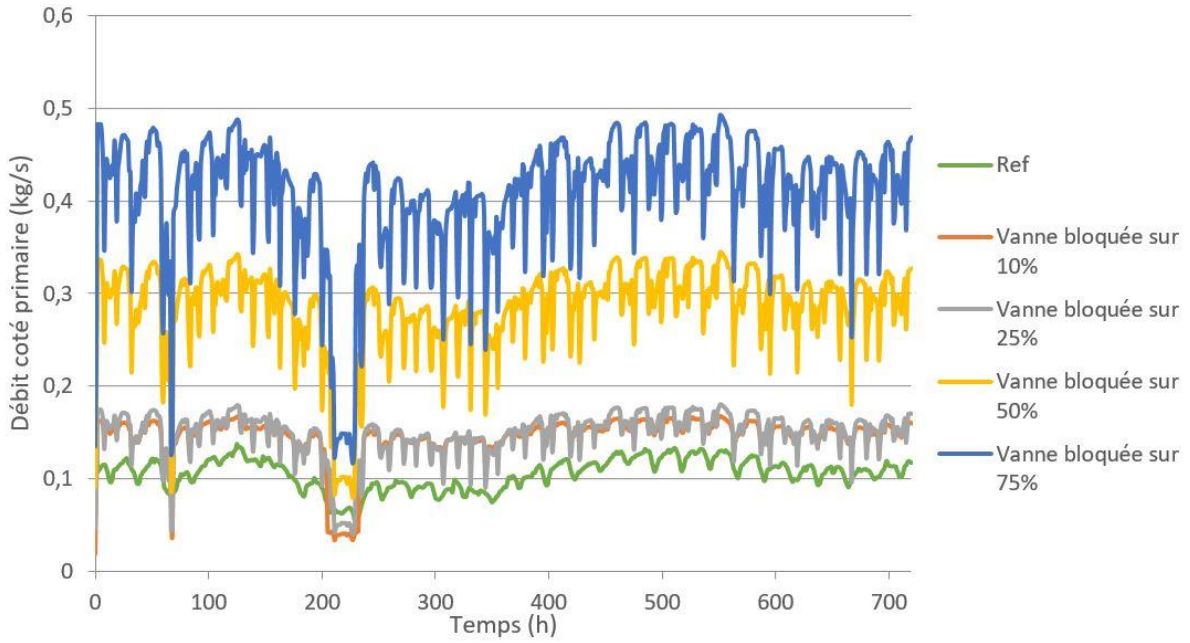


Figure 35 Évolution temporelle du débit massique primaire

Pour comprendre pleinement l'instabilité du débit massique, une analyse spectrale a été réalisée. Les résultats soulignent que, pour un fonctionnement normal, les variations de débit massique les plus évidentes apparaissent chaque 24h, 12h et 8h, en accord avec les principales variations de la demande de chauffage. En revanche, lorsque la vanne est bloquée, les variations les plus significatives apparaissent à une fréquence plus basse, inférieure à 6h, ce qui signifie que des variations élevées du débit apparaissent plus de 4 fois par jour.

Ainsi, pour disposer d'un indicateur facile à utiliser, un indicateur basé sur la variation relative du débit massique est proposé. Selon l'analyse spectrale, lorsqu'une vanne est bloquée, les variations élevées du débit massique apparaissent plus de 4 fois par jour. En mesurant le débit massique chaque heure, il est possible de tracer l'évolution du débit massique relatif. Une variation relative du débit massique de +-15 % en une heure est considérée comme une variation élevée.

$$D_m = \frac{\dot{m}_t - \dot{m}_{t+\Delta t}}{\dot{m}_{t+\Delta t}}$$

Le Figure 36 montre l'utilisation de l'indicateur dans le cas d'une vanne bloquée et d'une vanne de fonctionnement normal. Pour un fonctionnement normal, le seuil de 15 % n'est pas dépassé. Ainsi, comme prévu, aucun défaut n'est détecté. Dans le cas de la vanne bloquée, le dysfonctionnement est détecté lorsque le seuil est dépassé (points rouges sur la Figure 36) plus de 4 fois par jour.

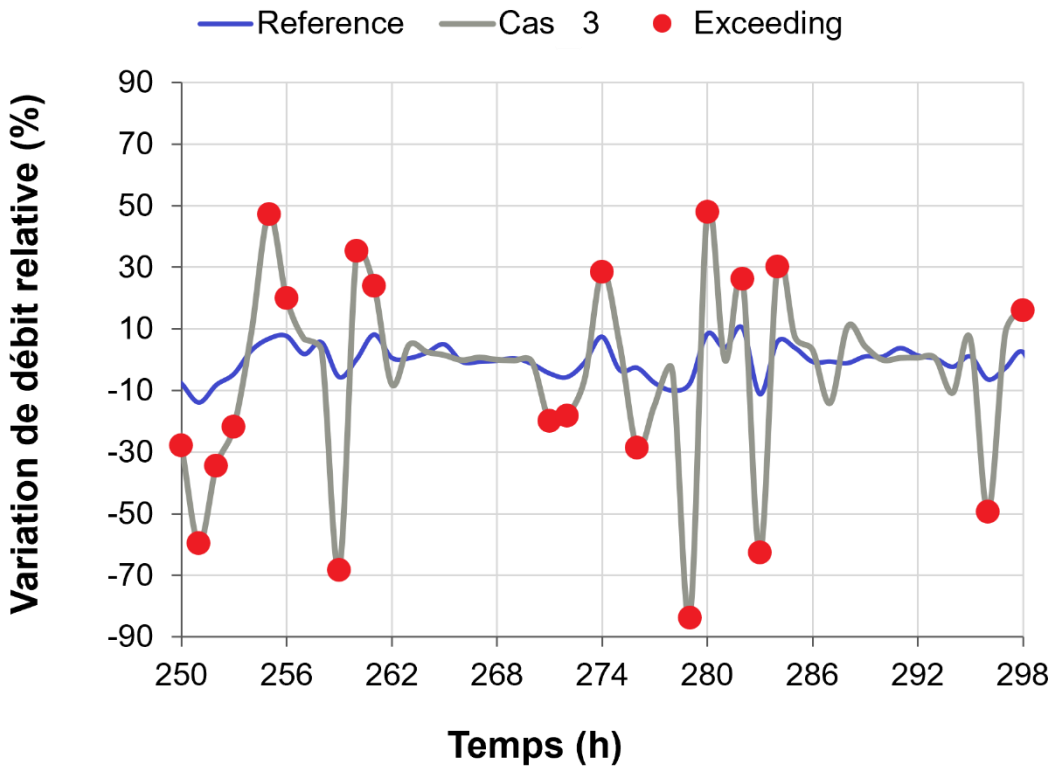


Figure 36 Évolution temporelle de la variation relative du débit massique pour la vanne bloquée et la vanne avec un fonctionnement normal

Cet indicateur peut détecter une panne spécifique ; il est facile à utiliser, nécessite peu de données et a été validé par des données in situ. Cependant, il ne peut pas être utilisé sur les vannes de régulation dans la sous-station ECS.

Fabre & al. [4] ont proposé un indicateur pour détecter un échangeur de chaleur encrassé. L'indicateur repose sur la même hypothèse que [10] . Pour construire un indicateur d'encrassement, on suppose d'abord que la plupart des échangeur utilisés sur les RDC sont des échangeurs de chaleur à plaques en contre-courant. La signature spécifique de l'encrassement est l'augmentation de la résistance thermique globale des HEX. En effet, sans encrassement, la résistance thermique peut s'exprimer ainsi :

$$R_{global,clean} = \frac{1}{h_p S} + \frac{1}{h_s S}$$

Cependant, selon la corrélation de Dittus-Boetler, le coefficient de transfert de chaleur convectif peut s'exprimer en fonction du débit massique comme suit :

$$hS = \gamma\, \dot{m}^{0.8}$$

Où le coefficient γ ne dépend que de la géométrie de l'échangeur et des caractéristiques du fluide, donc dans notre cas c'est une constante. En supposant que la résistance conductrice des plaques soit négligeable, la résistance thermique peut être réécrite comme suit :

$$R_{global,clean} = \frac{1}{\gamma \dot{m}_p^{0.8}} + \frac{1}{\gamma \dot{m}_s^{0.8}}$$

$$R_{global,clean} = \frac{1}{\gamma} \frac{\dot{m}_p^{0.8} + \dot{m}_s^{0.8}}{\dot{m}_p^{0.8}\, \dot{m}_s^{0.8}}$$

$$R_{global,clean} = \frac{1}{\gamma}\,\dot{M} \quad with \quad \dot{M} = \frac{\dot{m}_p^{0.8} + \dot{m}_s^{0.8}}{\dot{m}_p^{0.8}\,\dot{m}_s^{0.8}}$$

Selon l'équation précédente, la résistance thermique sans encrassement évolue linéairement selon $\dot{M}$. Cependant, lorsque l'encrasssement apparaît, la résistance thermique globale n'est plus linéaire (voir Figure 37) :

$$R_{total} = R_{global,clean} + R_{fouling}$$

De plus, il est nécessaire d'identifier un seuil à partir duquel l'impact de l'encrassement dégrade significativement la performance de la sous-station. Selon l'étude, la température de retour chute de plus de 5°C lorsque le rapport entre la résistance thermique avec et sans encrassement est supérieur à 1,4. On considère qu'une baisse de 5°C est suffisamment importante pour dégrader notablement les performances. Par conséquent, un dysfonctionnement sera détecté lorsque :

$$R_{total} > 1.4\ R_{global,clean}$$

La résistance thermique sans encrassement peut être calculée à partir des données mesurées (les températures des deux côtés et la puissance échangée) juste après un nettoyage complet de l'échangeur. Grâce aux mêmes données, la résistance thermique pendant le fonctionnement peut également être calculée :

$$R_{total} = \frac{DTLM}{P} \quad with \quad DTLM = \frac{(T_{p,in} - T_{s,out}) - (T_{p,out} - T_{s,in})}{\ln(T_{p,in} - T_{s,out}) - \ln(T_{p,out} - T_{s,in})}$$

Ainsi, en mesurant les températures et débits des deux côtés, l'évolution de la résistance thermique peut être tracée ainsi que le seuil à ne pas dépasser. La figure 37 illustre la méthodologie en représentant les données sur un graphique. Lorsque les données de résistance thermique dépassent le seuil, l'effet de l'encrassement est suffisamment important pour nécessiter un nettoyage.

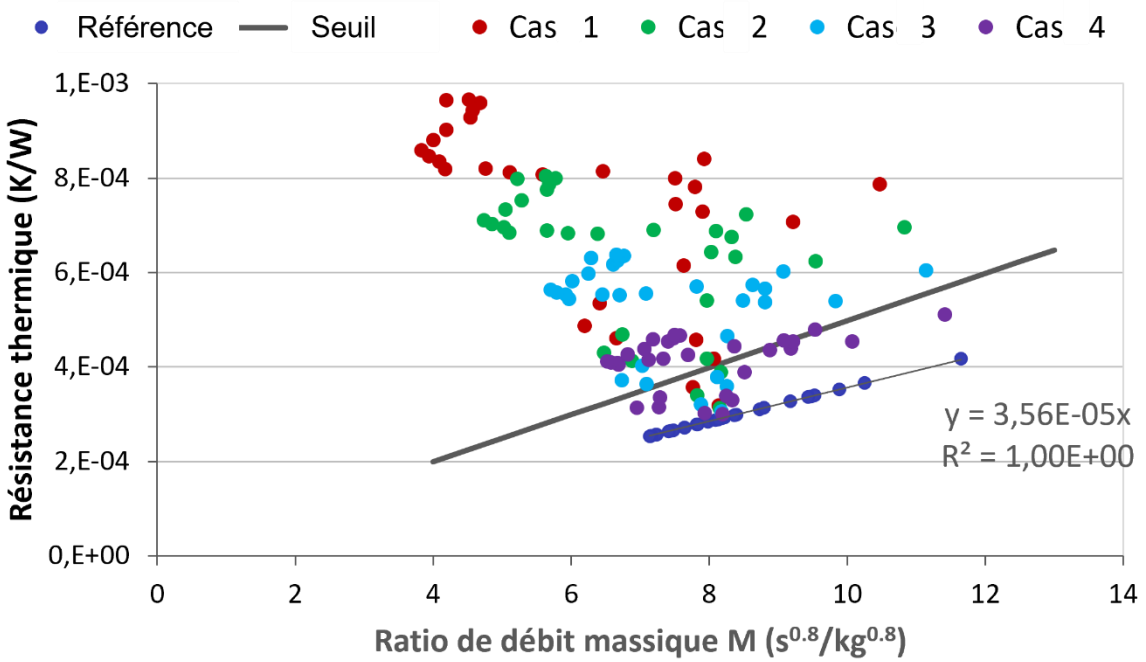


Figure 37 Indicateur de détection d'encrassement (cas 1 et 4 représentent des échangeurs de chaleur encombrés)

Cet indicateur peut détecter un défaut spécifique ; il est facile à utiliser et a été validé grâce à des données in situ. Cependant, il nécessite des données du côté secondaire.

Fabre & al [4] ont proposé un indicateur pour détecter une vanne bloquée du côté secondaire. La signature spécifique du fonctionnement anormal de la vanne secondaire est un débit massique presque constant. Par ailleurs, mesurer le débit massique dans les radiateurs est assez difficile à mettre en œuvre et assez coûteux. Par conséquent, une mesure basée sur les températures des radiateurs d'entrée et de sortie est plus simple et plus précise. La question est donc : quel est l'impact d'un débit constant sur la température du radiateur ? La relation entre la température et le débit massique dans ce cas peut s'exprimer par ces équations suivantes :

$$= Cp\ \dot{m}_{rad}\left(T_{in,rad} - T_{out,rad}\right) = KS\ DTLM_{rad} = KS\ \frac{\left(T_{in,rad} - T_{out,rad}\right)}{\ln\left(\frac{T_{in,rad} - T_{indoor}}{T_{out,rad} - T_{indoor}}\right)}$$

$$Cp\ \dot{m}_{rad} = \frac{KS}{\ln\left(\frac{T_{in,rad} - T_{indoor}}{T_{out,rad} - T_{indoor}}\right)}$$

Dans l'équation précédente, tous les paramètres sont constants lorsqu'une vanne est bloquée, sauf les températures. En effet, car la plage de température est constante, ne varie pas en raison du dysfonctionnement et KS dépend du débit qui est constant dans ce cas. Par conséquent, le facteur doit être constant s'il y a une vanne bloquée et doit varier dans le fonctionnement normal. Ce raisonnement est validé par le $Cp\ \dot{m}_{rad} DTLM' = \frac{1}{\ln\left(\frac{T_{in,rad} - T_{indoor}}{T_{out,rad} - T_{indoor}}\right)}$ Figure 38.

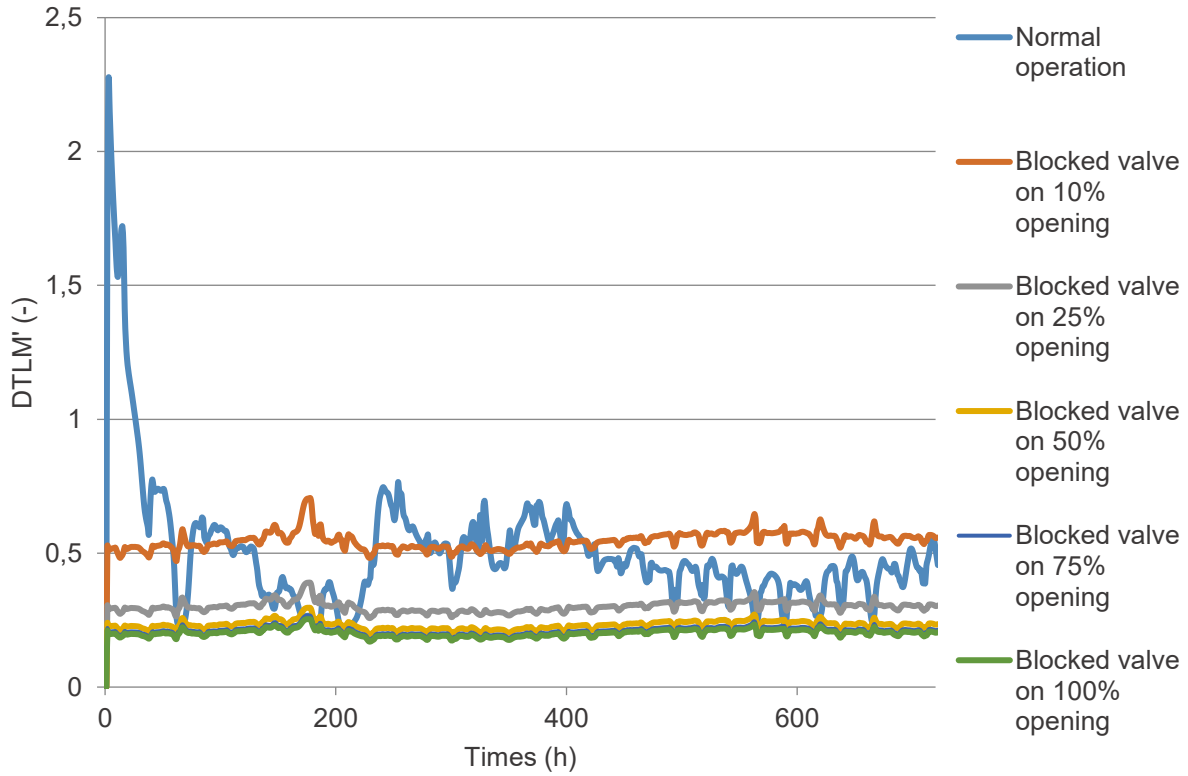


Figure 38 Évolution temporelle des radiateurs dégradés DTLM pour chaque cas

Pour détecter la non-variation du facteur, un indicateur de performance basé sur la variation relative de $DTLM'$ a été développé (voir Figure 39). L'idée est de suivre la variation relative et d'envoyer une alerte lorsqu'un seuil de 10 % n'est pas dépassé au moins deux fois par semaine. Cependant, le seuil doit être validé à l'aide de données in situ.

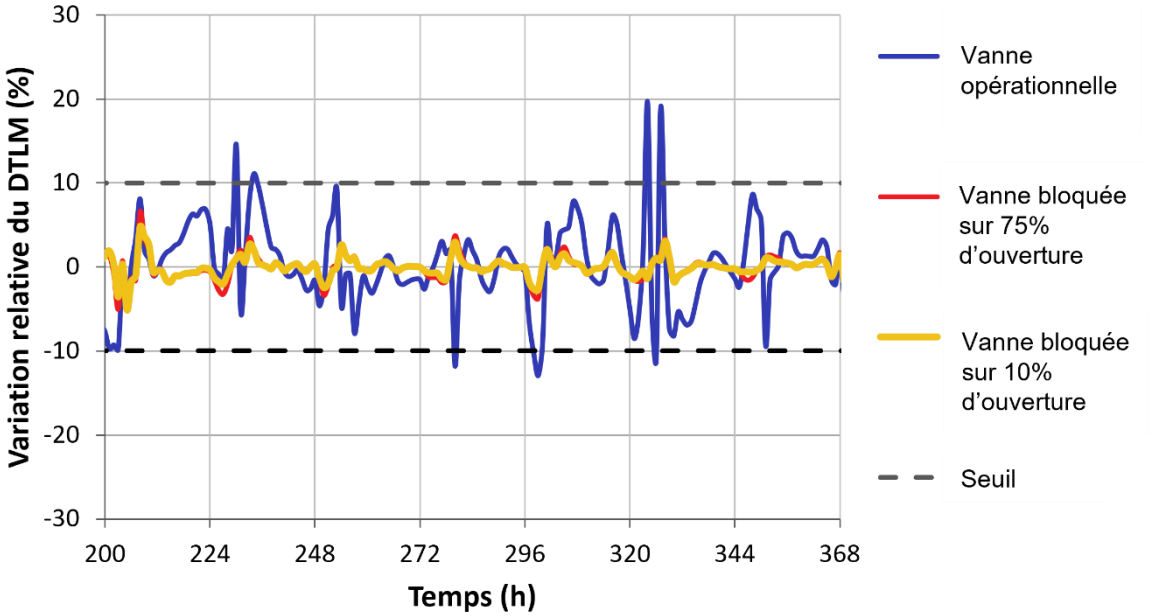


Figure 39 Évolution temporelle de la variation relative du DTLM sur une semaine

Fabre & al [4] ont proposé un indicateur pour détecter une température de retour primaire ECS inadaptée En effet, l'augmentation du débit massique de recirculation dégrade la performance de la sous-station. Par conséquent, le facteur important est le rapport entre le débit massique de recirculation et le débit massique moyen de demande journalier :

$$F = {\dot{m}_{recirc}}/{\dot{m}_{demand}}$$

Plus le rapport F est élevé, moins le système est efficace. Cependant, il est difficile de le mesurer car les données du côté secondaire de l'échangeur de chaleur ECS ne sont généralement pas disponibles. Par conséquent, l'indicateur doit utiliser les données disponibles, c'est-à-dire les données du côté primaire. Le concept de l'indicateur est donc de comparer l'efficacité de l'échangeur ECS de chaque sous-station avec les cas de référence en utilisant uniquement les températures d'entrée et de sortie du côté primaire de l'échangeur (voir Figure 40).

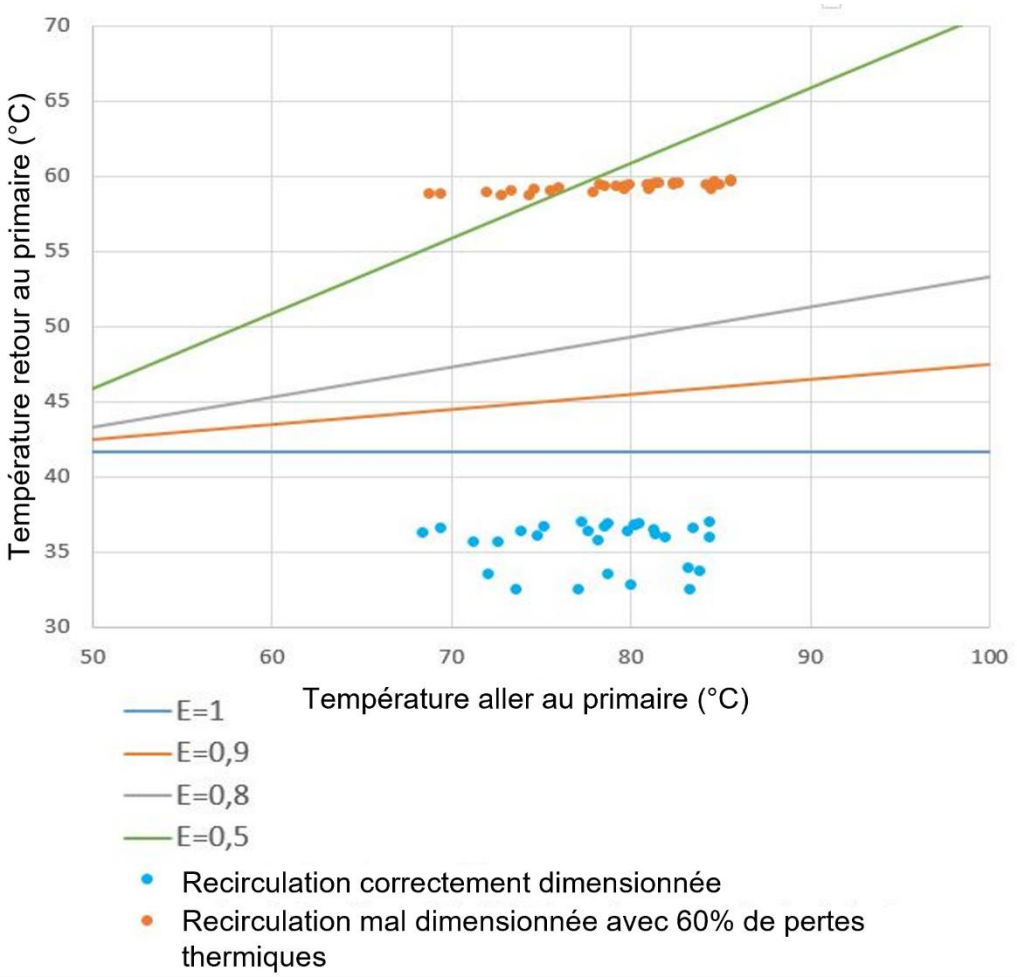


Figure 40 Indicateur de détection d'une température de retour ECS trop élevée

Les cas de référence sont représentés par les lignes d'efficacité constante (voir **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**). Pour construire ces lignes, trois hypothèses sont nécessaires : sur la température de l'eau froide en ville, sur la température de retour de la boucle de recirculation et une sur le rapport F. Elles sont déterminées à l'aide des équations suivantes :

$$E = \frac{(T_{p,in} - T_{p,out})}{(T_{p,in} - T_{s,in})}$$

$$(\dot{m}_{recirc} + \dot{m}_{demand})T_{s,in} = \dot{m}_{recirc}\, T_{recirc} + \dot{m}_{demand}\, T_{cold,water}$$

$$T_{p,out} = (1 - E)\, T_{p,in} + \frac{E}{1 + F}\left(T_{recirc}\, F + T_{cold,water}\right)$$

En mesurant la température du côté primaire, il est possible de déterminer l'efficacité de l'échangeur ECS sous certaines hypothèses. En effet, comme montré sur **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**, les points de mesure correspondant à un système défectueux (point orange) sont proches de la ligne d'efficacité de 0,5. Habituellement, un échangeur de chaleur ECS sur un DH a une valeur d'efficacité comprise entre 0,8 et 0,95. Ainsi, l'indicateur détecte un dysfonctionnement dans le système ECS. Au contraire, les points de mesure correspondant à un système non défectueux (point bleu) sont en dessous de la ligne d'efficacité 1. Cela signifie seulement que les hypothèses prises pour construire l'indicateur sont trop fortes. Ainsi, alimentation ECS fonctionne mieux que prévu.

References

[1] H. Gadd et S. Werner, «Fault detection in district heating substation,» *Applied energy,* vol. 157, pp. 51-59, 2015.

[2] S. Mansson, P.-O. Johansson Kallioniemi, M. Thern et T. Van Oevelen, «Faults in district heating customer installations and ways to approach them: Experiences from Swedish utilities,» *Energy,* vol. 180, pp. 163-174, 2019.

[3] S. Frederiksen et S. Werner, District heating and cooling, Studentlitteratur, 2013.

[4] A. Fabre, C. Duchayne, T. Nyberg, V. Gavan, K. Lygnerud et P. Stabat, «Cost benefit study on the building secondary network for improving DH performance,» IEA DHC/CHP, 2023.

[5] P.-O. Johansson, P. Lauenburg et J. Wollerstrand, «Improved cooling of district heating water in substations by using alternative connection schemes,» *22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems,* pp. 843-852, 2009.

[6] S. Buffa, M. Fouladfar, G. Franchini, I. Lozano Gabarre et M. Andrés Chicote, «Advanced Control and Fault Detection Strategies for District Heating and Cooling Systems—A Review,» *Applied sciences,* vol. 11, n° %11, p. 455, 2021.

[7] A. Rafati et H. R. Shaker, «Predictive maintenance of district heating networks: A comprehensive review of methods and challenges,» *Thermal Science and Engineering Progress,* vol. 53, p. 102722, 2024.

[8] M. Neumayer, D. Stecher, S. Grimm, A. Maier, D. Bücker et J. Schmidt, «Fault and anomaly detection in district heating substations: A survey on methodology and data sets,» *Energy,* vol. 276, p. 127569, 2023.

[9] R. Kim, Y. Hong, Y. Choi et S. Yoon, «System-level fouling detection of district heating substations using virtual-sensor-assisted building automation system,» *Energy,* vol. 227, p. 120515, 2021.

[10] E. Guelpa et V. Verda, «Automatic fouling detection in district heating substations: Methodology and tests,» *Applied energy,* vol. 258, p. 114059, 2020.

[11] N. Zimmerman, E. Dahlquist et K. Kyprianidis, «Towards On-line Fault Detection and Diagnostics in District Heating Systems,» *Energy procedia,* vol. 105, pp. 1960-1966, 2017.

[12] P. Xue, Z. Zhou, X. Fang, X. Chen, L. Liu, Y. Liu et J. Liu, «Fault detection and operation optimization in district heating substations based on data mining techniques,» *Applied energy,* vol. 205, pp. 926-940, 2017.

[13] H. Gadd et S. Werner, «Achieving low return temperatures from district heating substations,» *Applied energy,* vol. 136, pp. 59-67, 2014.

[14] S. Mansson, K. Davidsson, P. Lauenburg et M. Thern, «Automated Statistical Methods for Fault Detection in District Heating Customer Installations,» *Energies,* vol. 12, n° %11, p. 113, 2018.

[15] A. Fabre, «Développement d'indicateur de performance et de détection de défauts sur les réseaux de chaleur dans une démarche d'optimisation de leur pilotage,» PhD thesis, MINES ParisTech, 2020.

[16] F. Theusch, P. Klein, R. Bergmann, W. Wilke, W. Bock et A. Weber, «Fault Detection and Condition Monitoring in District Heating Using Smart Meter Data,» *PHM Society European Conference,* vol. 6, n° %11, p. 11, 2021.

[17] S. Farouq, S. Byttner, M.-R. Bouguelia, N. Nord et H. Gadd, «Large-scale monitoring of operationally diverse district heating substations: A reference-group based approach,» *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* vol. 90, p. 103492, 2020.