SHaKE
Sharing Knowledge on Energy Communities

Co-funded by the European Union

Module 6
Rénovation des systèmes de chauffage urbain

Element du programme éducatif SHaKE sur les systèmes de chauffage et de refroidissement urbains

Livret de cours

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

Version : 1.0
Date : mars 2026
https://www.shakeproject-dhc.eu/

Projet
Partager la chaleur et les connaissances sur les communautés énergétiques (SHaKE)
Partenariats de coopération Erasmus+ KA220-HED dans l'enseignement supérieur
Projet n° : 2023-1-HU01-KA220-HED-000160219

Auteurs
Dr Balázs Bokor, Zoltán Takács (Université de technologie et d'économie de Budapest)

Rédacteurs en chef
Eva Szalma, Dr Balázs Bokor, Zoltán Takács

Mention relative au financement de l'UE et clause de non-responsabilité

Financé par l'Union européenne. Les opinions exprimées sont cependant celles de l'auteur ou des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de l'Union européenne ou de la Fondation Tempus Public. Ni l'Union européenne ni l'autorité octroyante ne peuvent en être tenues responsables.

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

Institutions partenaires
Université Jaume I de Castellón, Espagne
Mines Paris – PSL, France

Remerciement
Cette publication a été développée dans le cadre du projet SHaKE. Le consortium tient à remercier tous les enseignants, chercheurs, professionnels et parties prenantes qui ont contribué au développement, à la révision et à l'amélioration des supports pédagogiques.

Licence
Sauf indication contraire, ce matériel est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Les utilisateurs peuvent partager et adapter le contenu, à condition qu'un crédit approprié soit accordé au projet SHaKE et aux auteurs, qu'un lien vers la licence soit fourni, et que tout changement soit indiqué.

Citation suggérée :
BME. Module 6 : Rénovation des systèmes de chauffage urbain. Projet SHaKE, 2026.

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

Guide pour utiliser le module 6

Ce module fait partie du programme éducatif SHaKE développé pour soutenir l'enseignement des systèmes de chauffage et de climatisation urbains (RCF) dans l'enseignement supérieur et la formation professionnelle.

Le module 6 se concentre sur la rénovation des systèmes de chauffage urbain, avec une attention particulière aux systèmes hérités à haute température, aux lotissements chauffés en quartier et à la transition vers un fonctionnement plus efficace, flexible et à faible émission de carbone. Il introduit le développement historique, les caractéristiques techniques et les inefficacités typiques des anciens systèmes de chauffage urbain, notamment dans des contextes où les systèmes à grande échelle étaient initialement conçus selon des hypothèses différentes de prix, de confort et d'efficacité énergétique.

Le module examine les mesures de rénovation au niveau du réseau et du bâtiment. Il couvre les améliorations des systèmes côté bâtiment et secondaires, la rénovation des systèmes de chauffage à tuyau unique, l'équilibrage hydraulique, les postes de transformation compacts et modulaires, les postes de niveau appartement, la mesure et la facturation de la consommation de chaleur, le chauffage urbain basse température, la maintenance prédictive, les outils numériques et les aspects économiques de la rénovation.

Le module combine explications techniques avec des études de cas réelles et des activités d'apprentissage appliqué. Le guide inclut des études de cas de développement et de rénovation urbaines de chauffage urbain, tandis que des activités de soutien distinctes permettent aux apprenants de diagnostiquer un système de chauffage urbain hérité hypothétique, d'élaborer une stratégie de rénovation et d'analyser la prise de décision économique dans un scénario de rénovation du chauffage urbain.

Le guide est principalement destiné à être une ressource pédagogique réutilisable pour les enseignants, enseignants et formateurs. Il peut être utilisé pour soutenir des conférences, des activités d'apprentissage hybride, des discussions en classe, des travaux pratiques, des études de cas et des formations professionnelles continues. Les diapositives de présentation accompagnantes, la banque de questions, le quiz d'auto-évaluation, les exercices pratiques de remise à neuf et les études de cas économiques sont conçus pour aider les enseignants à adapter le contenu à leur propre contexte pédagogique.

Les étudiants et les professionnels peuvent également utiliser le module pour des études indépendantes, surtout s'ils possèdent déjà des connaissances de base en systèmes de chauffage urbain, services de bâtiment, postes électriques, systèmes hydroniques et efficacité énergétique.

Principaux sujets abordés dans le module

- Développement historique des systèmes de chauffage urbain hérités
- Systèmes de chauffage urbain à haute température et leurs limites
- Rénovation des systèmes de chauffage urbain dans des lotissements résidentiels
- Rénovation du bâtiment et du système secondaire
- Rénovation du système de chauffage à tuyau unique
- Équilibrage hydraulique et pompes à fréquence variable
- Sous-stations compactes et modulaires
- Postes de niveau appartement et solutions individuelles d'alimentation en chaleur

- Mesure de la consommation de chaleur et facturation
- Transition vers le chauffage urbain à basse température
- Intégration de sources de chaleur renouvelables et à faible exergie
- Maintenance prédictive, surveillance et outils numériques
- Modèles économiques et aspects économiques du chauffage urbain
- Structures tarifaires, tarifs motivationnels et modèles de chaleur en tant que service
- Études de cas sur la rénovation et le développement du chauffage urbain
- Conception et priorisation de la stratégie de rénovation

Résultats d'apprentissage du module 6

Le module est conçu pour soutenir le développement des compétences et compétences suivantes.

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

- expliquer le développement historique, la structure et les caractéristiques opérationnelles des systèmes de chauffage urbain hérités ;
- identifier les sources courantes d'inefficacité dans les réseaux de chauffage urbain, les bâtiments, les postes et les systèmes de contrôle ;
- analyser les défis d'équilibrage hydraulique et évaluer les solutions techniques appropriées pour améliorer la répartition de la chaleur ;
- évaluer les mesures de rénovation au niveau du bâtiment et du réseau, y compris les améliorations d'isolation, la modernisation des postes et les stratégies de contrôle avancées ;
- évaluer les avantages et les exigences techniques des systèmes de chauffage urbain à basse température et de l'intégration de la chaleur renouvelable ;
- expliquer le rôle de la mesure de la chaleur, de la facturation et des structures tarifaires dans le soutien à l'efficacité du chauffage urbain ;
- comparer les modèles d'affaires et les approches de financement du chauffage urbain dans des contextes de rénovation ;
- Développer et justifier des stratégies de rénovation qui améliorent l'efficacité énergétique, réduisent les pertes de chaleur, améliorent le confort des utilisateurs et soutiennent la décarbonation du chauffage urbain.

Principales tâches et activités

Le module combine apprentissage conceptuel, analyse d'études de cas, planification pratique de la rénovation et évaluation. Les études de cas incluses dans le guide montrent comment les concepts de rénovation sont appliqués dans des projets réels de chauffage urbain. À travers l'analyse d'exemples pratiques, les apprenants examinent les solutions techniques, les défis de mise en œuvre, les bénéfices acquis et les leçons tirées des initiatives de modernisation. Les études de cas contribuent à combler le fossé entre théorie et pratique en montrant comment les mesures de rénovation peuvent contribuer à l'amélioration des performances du système, du confort des utilisateurs et de la durabilité.

Le module est également soutenu par un exercice pratique de rénovation distinct. Dans cette activité, les apprenants évaluent un système de chauffage urbain hérité hypothétique et développent une stratégie de rénovation. Ils identifient les problèmes techniques, analysent

leurs causes et leurs impacts, proposent des mesures de modernisation et priorisent les interventions en fonction de critères techniques, économiques et opérationnels. Cette activité d'apprentissage par la pratique encourage la pensée critique, la résolution de problèmes et l'application pratique des concepts de rénovation introduits dans le module.

De plus, le module comprend une étude de cas en classe économique axée sur la prise de décision de rénovation du chauffage urbain. Cette activité permet aux apprenants d'examiner les modèles économiques, les structures tarifaires, les options de financement, les points de vue des parties prenantes et les scénarios de sensibilité dans un contexte réaliste de rénovation.

Les résultats d'apprentissage sont soutenus par un quiz d'auto-évaluation au niveau des modules et une banque de questions réutilisable. Les supports d'évaluation évaluent la compréhension des apprenants des principes de la rénovation du chauffage urbain, des technologies de modernisation, de l'équilibrage hydraulique, des mises à niveau des sous-stations, des concepts de chauffage urbain à basse température et de la prise de décision économique. L'évaluation se concentre sur la capacité à interpréter les défis techniques, comparer des solutions alternatives et appliquer le raisonnement technique à des scénarios réalistes de chauffage urbain.

Charge de travail estimée

Ce module représente environ 7 heures d'apprentissage, incluant des cours magistraux, des exercices pratiques, des études de cas, des études indépendantes et des évaluations.

Les enseignants peuvent adapter la charge de travail en fonction du niveau du cours, des supports sélectionnés et du format d'enseignement. Le module peut être utilisé comme :

- une unité d'enseignement complète,
- un ensemble de documents de cours sélectionnés,
- un composant d'apprentissage hybride,
- un forfait d'exercices de rénovation pratique,
- un ensemble d'étude de cas et de prise de décision,
- ou une ressource complémentaire pour les cours existants.

Activités et heures d'apprentissage

Type d'activité	Répartition du temps (heures)	Description
Conférences	3 h	Introduction aux systèmes de chauffage urbain hérités, mesures de rénovation, systèmes côté bâtiment, postes électriques, transition à basse température, comptage, modèles économiques et études de cas
Exercices	1 h	Exercice de rénovation pratique basé sur le diagnostic et la modernisation d'un système de chauffage urbain hérité

Études de cas	0,5 h	Discussion sur des études de cas réelles sélectionnées de rénovation de chauffage urbain et de développement urbain
Auto-apprentissage	2 h	Lecture autonome, révision des supports de cours et préparation à l'exercice ou à l'évaluation
Évaluation	0,3 h	Quiz d'auto-vérification au niveau du module et/ou des questions sélectionnées de la banque de questions
Total des heures d'apprentissage	**7 h**	

Groupes cibles

Ce guide est principalement destiné aux enseignants, enseignants et formateurs qui souhaitent utiliser ou adapter les supports SHaKE dans leurs propres activités d'enseignement ou de formation.

Les principaux groupes cibles sont :

- chargés de cours dans l'enseignement supérieur en ingénierie, services du bâtiment, systèmes énergétiques et domaines connexes,
- des formateurs impliqués dans la formation professionnelle ou continue sur le chauffage et la climatisation urbains,
- les enseignants développant des activités d'apprentissage mixtes, modulaires ou axées sur la pratique,
- Personnel académique à la recherche de ressources pédagogiques réutilisables sur les systèmes énergétiques de district durables,
- formateurs et enseignants travaillant sur des sujets liés à la rénovation du chauffage urbain, aux systèmes énergétiques des bâtiments, aux infrastructures énergétiques urbaines et à l'efficacité énergétique.

Les supports peuvent également être utilisés par les étudiants, professionnels et apprenants indépendants souhaitant étudier individuellement certains sujets. Pour un usage autonome, il est recommandé de connaître les bases préalables dans les domaines de l'ingénierie concernés.

Utilisation recommandée par les éducateurs et les formateurs

Le module 6 peut être utilisé de manière flexible comme unité d'enseignement complète ou comme un ensemble de ressources pédagogiques sélectionnées. Les enseignants peuvent combiner les supports selon le niveau du cours, le temps d'enseignement disponible et les résultats d'apprentissage souhaités.

Besoins pédagogiques	Ressource suggérée pour le module 6
Introduction du sujet	Utilisez l'aperçu du module et les diapositives introductives pour présenter la pertinence de la rénovation du chauffage urbain, des systèmes hérités et la transition vers un fonctionnement à basse température.
Préparer les apprenants avant le cours	Assignez certaines sections du guide comme prélecture pour les activités en classe inversée ou hybride.
Conférences ou séminaires de soutien	Utilisez les diapositives de la présentation pour expliquer les mesures de rénovation, l'équilibrage hydraulique, la modernisation des sous-stations, le chauffage urbain à basse température, le comptage, les modèles économiques et les études de cas.
Vérification de la compréhension	Utilisez des questions sélectionnées de la banque de questions pour discuter, faire de courtes vérifications en classe, faire des évaluations formatives ou des quiz.
Développement des compétences en ingénierie appliquée	Utilisez l'exercice pratique de rénovation pour le travail de groupe, les devoirs, l'apprentissage par projet ou la discussion guidée sur l'ingénierie.
Soutien à la prise de décision économique et stratégique	Utilisez l'étude de cas économique pour discuter des modèles de propriété, des tarifs, des stratégies de financement, des points de vue des parties prenantes et de l'analyse de sensibilité.
Soutien à la discussion d'études de cas	Utilisez les exemples concrets du guide pour comparer différentes approches de la rénovation du chauffage urbain et du développement du réseau urbain.
Soutien à la révision indépendante	Dirigez les apprenants vers le quiz d'auto-évaluation au niveau du module après avoir étudié les matériaux pertinents.
Adaptation aux contextes pédagogiques locaux	Sélectionnez, combinez ou modifiez les sections du guide, les diapositives, les questions, les exercices pratiques et l'étude de cas selon le programme, le niveau du participant et le contexte professionnel.

Parcours recommandé pour les apprenants indépendants

Les étudiants et professionnels utilisant le module de manière autonome peuvent suivre la séquence ci-dessous.

Etapes	Activité suggérée
Révisez la présentation introductive	Familiarisez-vous avec les concepts principaux, la terminologie et la structure du module.
Étudiez les documents du guide	Lisez les explications détaillées, les principes d'ingénierie et les concepts de rénovation présentés dans le guide.
Examinez les études de cas réelles	Comparez la manière dont la rénovation et le développement du chauffage urbain sont abordés dans différents contextes.
Regardez la vidéo du module	Utilisez la vidéo du module et ses questions d'évaluation jointes pour explorer un sujet, un concept ou un aspect pratique du module sélectionné.
Complétez le quiz d'auto-vérification	Testez votre compréhension des concepts clés et des principes techniques abordés dans le module.
Tentez l'exercice de rénovation pratique	Appliquez les connaissances acquises en diagnostiquant un système de chauffage urbain hérité et en proposant une stratégie de rénovation prioritaire.
Examinez l'étude de cas économique	Découvrez comment les modèles économiques, les tarifs, le financement et les intérêts des parties prenantes influencent les décisions de rénovation du chauffage urbain.
Consultez la banque de questions	Utilisez les questions pour réviser, discuter ou préparer l'évaluation.

Supports disponibles

Les ressources d'apprentissage et supports d'évaluation disponibles incluent :

- diapositives de présentation des sujets des modules,
- une banque de questions réutilisable,
- un quiz d'auto-évaluation au niveau du module,
- une vidéo du module avec des questions d'évaluation jointes,
- un exercice de rénovation pratique basé sur le diagnostic et la modernisation d'un système de chauffage urbain hérité,
- Une étude de cas économique en classe sur la prise de décision de la rénovation du chauffage urbain, les modèles économiques, les tarifs, le financement et les points de vue des parties prenantes,
- Diapositives d'activité soutenant l'étude de cas économique.

L'exercice pratique et l'étude de cas économique peuvent être utilisés pour des travaux de groupe, des devoirs, de courts rapports techniques ou économiques, des présentations orales, des affiches ou des discussions en classe. Les enseignants peuvent choisir une ou les deux activités selon le niveau des apprenants, le temps d'enseignement disponible et les résultats d'apprentissage souhaités.

Table des matières

Projet 2

Auteurs 2

Rédacteurs en chef 2

Reconnaissance et avertissement du financement de l'UE ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

Coordinateur 2

Institutions partenaires 2

Remerciement 2

Licence 2

1.1 Introduction 11

1.1.1 Contexte historique et défi posé par les systèmes hérités 11

1.1.2 Anatomie technique du chauffage urbain hérité (haute température) 12

1.2 Mesures au niveau du bâtiment et du système secondaire 15

1.2.1 Améliorations de l'enveloppe thermique 15

1.2.2 Radiateurs, chauffage par le sol et adaptations de systèmes 15

1.2.3 Rénovation du système à tuyau unique 15

1.2.4 Le défi du déséquilibre hydraulique 16

1.2.5 La solution : Équilibrage au niveau des cordes 17

1.3 Modernisation des postes de transformation et solutions par appartement 18

1.3.1 Rénovation du DHC dans des lotissements résidentiels 18

1.3.2 Transition vers le chauffage urbain à basse température (LTDH) 20

1.3.3 Considérations techniques dans la transition 21

1.3.4 Mesure et facturation de la consommation de chaleur 23

1.4 Modèles économiques et aspects économiques du chauffage urbain 25

1.4.1 Modèles économiques courants 25

1.4.2 Flux de revenus et structures de coûts 26

1.4.3 Tarification de la chaleur et tarifs motivationnels 26

1.4.4 Transition vers le « chauffage en tant que service » 26

ÉTUDES DE CAS 28

1.5 Développement DH : Impliquant les centres-villes 28

1.5.1 Réseau de chauffage et d'électricité Bunhill, Londres [11] 28

1.5.2 Projet Citigen, Londres [12] 30
1.5.3 Réseau énergétique décentralisé de Somers Town, Londres [13] 32
1.5.4 Développement du chauffage et du refroidissement urbain de Paris [14] 33
1.5.5 Réseau d'eau potable comme source de chaleur, Copenhague [15] 35
1.5.6 Chauffage urbain dynamiquement distribué, Helsinki [16] 37
Bibliographie 39

1.1 Introduction

Les systèmes de chauffage urbain (RCU) sont un élément essentiel de l'infrastructure énergétique urbaine : ils centralisent la production de chaleur et distribuent l'énergie thermique via un réseau de tuyaux isolés à plusieurs utilisateurs finaux, permettant de des économies d'échelle, une intégration plus facile de grandes sources de chaleur et—potentiellement—des émissions urbaines plus faibles que les bâtiments chauffés individuellement. Cependant, de nombreux RCU européens ont été construits il y a des décennies sous des hypothèses de conception et des régimes de prix de l'énergie qui diffèrent nettement des objectifs actuels de décarbonation. La nécessité de moderniser et de rénover les systèmes existants est donc urgente : la rénovation restaure non seulement l'efficacité perdue, mais permet aussi l'intégration de sources de chaleur à faible exergie, de contrôles intelligents et de nouveaux modèles économiques qui, ensemble, peuvent transformer les RCU en une technologie centrale pour les villes bas carbone. Ce chapitre synthétise les dimensions techniques, économiques et institutionnelles de la rénovation des systèmes de chauffage urbain.

1.1.1 Contexte historique et défi posé par les systèmes hérités

De nombreux systèmes RCU, en particulier en Europe de l'Est et dans les anciens pays soviétiques, ont été conçus à une époque d'énergie primaire relativement peu coûteuse et optimisés pour de grands blocs résidentiels avec des enveloppes thermiques faibles. Ces systèmes « haute température » fonctionnaient généralement avec des températures d'alimentation comprises entre 100 et 130 °C et des températures de retour autour de 60 à 70 °C, utilisaient des tuyaux isolés de grand diamètre et s'appuyaient souvent sur des centrales de production à combustibles fossiles ou de grandes unités combinées de chauffage et d'électricité (CHP). De tels paramètres de conception étaient adaptés à la forte demande de chaleur et à l'isolation limitée des bâtiments de l'époque, mais ils créent des frictions avec les objectifs actuels : ces systèmes entraînent de fortes pertes de transmission, sont inefficaces avec les bâtiments modernes à faible consommation d'énergie, et sont mal adaptés aux sources de chaleur à faible exergie (par exemple, géothermie, chaleur ambiante, chaleur usée industrielle ou grandes pompes à chaleur).

Les premiers systèmes de chauffage urbain représentent un défi majeur par rapport aux attentes actuelles. En raison de températures de débit élevées et d'une isolation insuffisante des tuyaux, ils fonctionnent avec de fortes pertes de chaleur, qui continuent de se détériorer avec le temps. De plus, ces systèmes ont une connectivité très limitée avec des sources de chaleur à faible exergie telles que les collecteurs solaires, la chaleur géothermique ou les pompes à chaleur. Ces systèmes entraînent des coûts d'entretien élevés, ce qui réduit leur efficacité. Du côté des consommateurs, de plus en plus de bâtiments sont rénovés, ce qui réduit la quantité d'énergie nécessaire à transporter, rendant ainsi le contrôle de la pression essentiel. Pour cette raison, il est moins adapté aux bâtiments modernes à faible consommation d'énergie et aux communautés résidentielles.

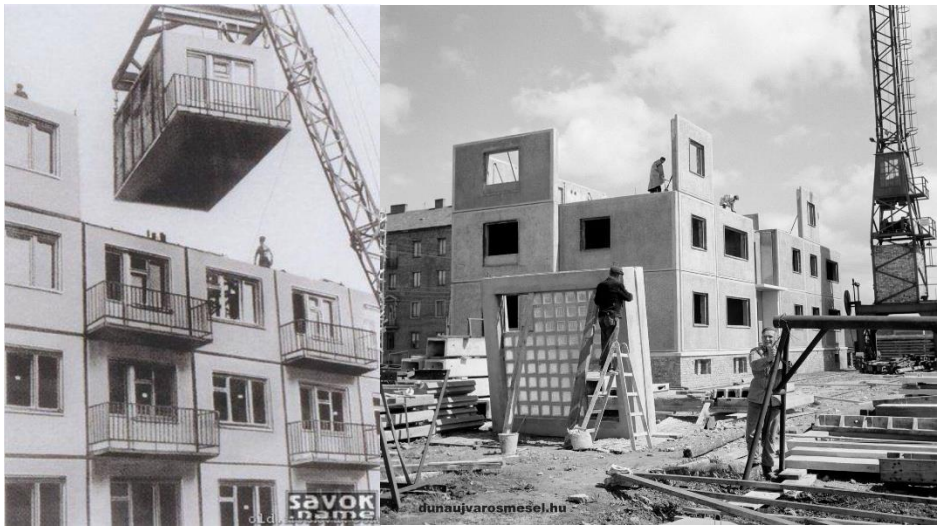


Figure 1. Construction de bâtiments préfabriqués [1]

1.1.2 Anatomie technique du chauffage urbain historique (haute température)

Entre les années 1950 et 1990, la plupart des pays d'Europe de l'Est ont mis en place des programmes de logements préfabriqués à grande échelle pour faire face aux graves pénuries de logements d'après-guerre, à l'industrialisation rapide et à la croissance urbaine. Influencés par les principes d'urbanisme socialiste, les gouvernements ont donné la priorité à la construction rapide et économique de blocs standardisés utilisant des panneaux en béton industriels (voir Figure 1), permettant la construction de millions d'unités en relativement peu de temps. Bien que ces développements aient considérablement amélioré le niveau de vie en fournissant des appartements modernes avec plomberie intérieure, eau chaude et chauffage urbain, la rapidité et l'accessibilité financière étaient souvent privilégiées par la qualité architecturale, la performance thermique et la durabilité à long terme. En conséquence, de nombreux lotissements urbains denses connectés à des réseaux centralisés, créant des concentrations exceptionnellement élevées en chaleur qui favorisaient initialement le fonctionnement économique des systèmes de chauffage urbain. Cependant, une mauvaise isolation, des fenêtres inefficaces, un contrôle limité des températures intérieures et des infrastructures vieillissantes entraînaient des pertes d'énergie importantes et une consommation excessive de chaleur. Par conséquent, de nombreux systèmes de chauffage urbain d'Europe de l'Est ont hérité d'une combinaison de densité de clients favorable et d'un parc immobilier inefficace, faisant des rénovations d'efficacité énergétique, des rénovations et de la modernisation des réseaux des priorités clés dans la transition énergétique en cours de la région.

Des systèmes de chauffage urbain de deuxième génération furent développés et largement déployés en Union soviétique et en Europe de l'Est entre les années 1950 et 1980 pour servir des lotissements préfabriqués et des quartiers industriels en forte expansion. Ces systèmes étaient conçus dans des économies planifiées centralement où l'objectif principal était d'assurer un approvisionnement chaleureux fiable et universel au coût d'investissement le plus bas, plutôt que d'optimiser l'efficacité énergétique ou le confort des consommateurs. La chaleur était généralement produite dans de grandes centrales de production et distribuée par des réseaux d'eau à haute température avec des possibilités limitées de contrôle local, tandis que les appartements manquaient généralement de dosage individuel ou de régulation thermostatique. Ainsi, les températures intérieures étaient maintenues bien au-dessus des exigences de confort, et les occupants régulaient fréquemment la température en ouvrant les

fenêtres en hiver. Combinée à des bâtiments mal isolés, des températures élevées et une consommation excessive de chaleur. À l'époque, cependant, les prix du carburant étaient fortement subventionnés et la sécurité énergétique privilégiée à l'efficacité, rendant les investissements dans des contrôles avancés, l'isolation ou la gestion de la demande économiquement peu attrayante dans le cadre de planification en vigueur. À la suite des transitions politiques et économiques des années 1990, la hausse des prix de l'énergie, les préoccupations environnementales et le vieillissement des infrastructures ont fondamentalement modifié ces conditions. Par conséquent, la modernisation des réseaux de chauffage urbain, l'installation de postes et de contrôles modernes, ainsi que la rénovation thermique des bâtiments sont devenues des mesures essentielles pour améliorer l'efficacité, réduire les coûts d'exploitation et assurer la viabilité à long terme des systèmes de chauffage urbain dans la région.

Pour concevoir des interventions de remise à neuf, il est essentiel de comprendre l'anatomie et les modes typiques de défaillance/inefficacité des systèmes RCU à haute température.

1. Production de chaleur : Traditionnellement, les chaudières au charbon, au fioul ou au gaz et les grandes centrales thermiques fournissent de la chaleur. Ces unités fonctionnent souvent mieux à haute température de retour et sont dimensionnées pour la demande maximale plutôt que pour des charges modernes variables. La décarbonation cherche à remplacer ou compléter ces éléments par la biomasse, la récupération de chaleur usée, les pompes à chaleur et les énergies renouvelables.
2. Canalisations de transport et de distribution : Des tuyaux de grand diamètre, comme montré à la figure 2, souvent fortement isolés lorsqu'ils sont neufs mais sujets au vieillissement et aux dommages, traversent des corridors urbains. Les pertes de chaleur dues aux anciennes conduites peuvent être importantes et augmenter la consommation de combustibles. Les joints vieillissants, la corrosion et les ponts thermiques sont des cibles courantes lors de la rénovation.



Figure 2. Conduites de RCU en surface [2]

3. Postes de transformation et échangeurs de chaleur : Les stations plus anciennes étaient souvent assemblées sur place à partir de nombreux composants ; la rénovation moderne privilégie des postes préfabriqués construits en usine, compacts, modulaires et instrumentés (échangeurs à plaques plates, pompes à vitesse variable, réservoirs d'expansion, contrôle et dosage). Les postes de niveau appartement peuvent permettre le contrôle de température par appartement, la

mesure et la suppression des boucles de circulation centrale pour l'Eau chaude Sanitaire (ECS).

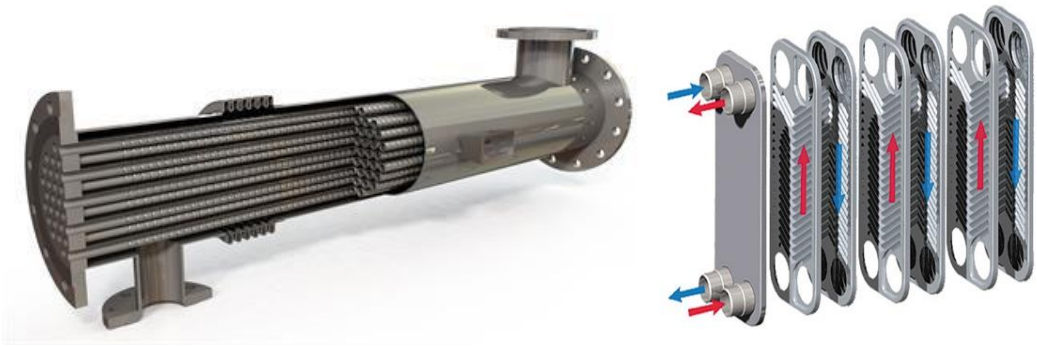


Figure 3. Échangeurs de chaleur à tubes-calandre (à gauche), échangeurs de chaleur à plaques (à droite) [3][4]

4. Distribution à l'échelle du bâtiment : Les radiateurs, les systèmes monotubes, les colonnes montantes et l'hydraulique interne déterminent l'efficacité avec laquelle la chaleur est distribuée dans les pièces. De nombreux immeubles préfabriqués de l'époque soviétique utilisaient des systèmes de chauffage monotubes (à circulation en série), ce qui complique la rénovation et une facturation équitable. Le déséquilibre hydraulique — lorsque les circuits situés à proximité de la pompe de circulation reçoivent un débit excessif tandis que d'autres sont sous-alimentés — constitue un problème très répandu, qui peut être corrigé au moyen de vannes d'équilibrage et d'un réglage approprié des pompes.
5. Régulation et mesure : Historiquement, une régulation thermostatique rudimentaire, des régimes centralisés de mise en marche et d'arrêt, ainsi que l'absence de comptage individuel par appartement ont nui à l'efficacité énergétique. La modernisation introduit une régulation de la pression différentielle, des robinets thermostatiques sur les radiateurs, des pompes à vitesse variable, des compteurs électroniques et la collecte des données à distance, afin de mieux adapter la fourniture de chaleur à la demande et d'assurer une facturation plus précise.

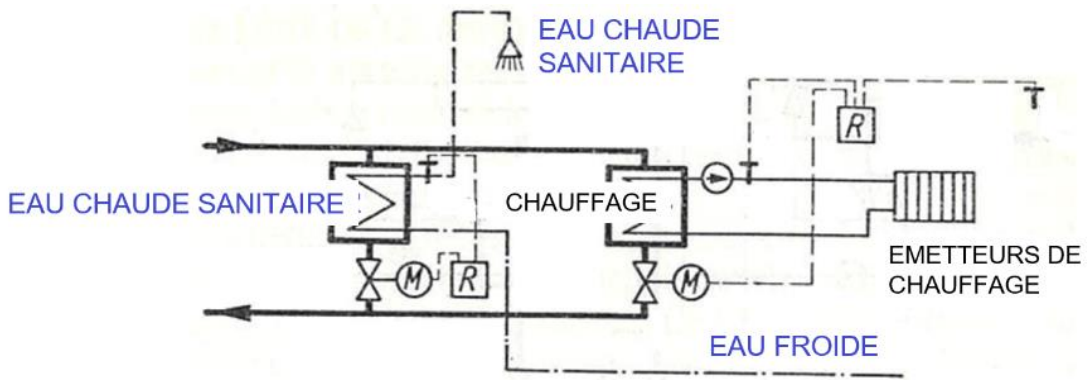


Figure 4. Sous-station de chauffage urbain avec eau chaude domestique et circuit de chauffage [5]

La compréhension de ces éléments techniques permet de poser le cadre des chapitres suivants consacrés aux mesures de rénovation ciblées. La littérature contemporaine sur les réseaux de chaleur souligne que l'avenir des réseaux de chaleur ne réside pas simplement

dans des « chaudières plus puissantes », mais dans l'intégration entre le réseau et les bâtiments, le fonctionnement flexible à basse température et une régulation intelligente.

1.2 Mesures au niveau du bâtiment et du système secondaire

La rénovation d'un réseau de chauffage urbain ne s'arrête pas aux canalisations de la rue ; elle doit s'étendre jusqu'aux bâtiments eux-mêmes. Une approche globale de la modernisation implique plusieurs stratégies clés :

1.2.1 Améliorations de l'enveloppe thermique

Une étape fondamentale consiste à réduire les besoins en chaleur grâce à l'amélioration de l'isolation — renforcement de l'isolation des murs, remplacement des fenêtres à simple vitrage par des vitrages modernes, isolation des combles et de la toiture — ce qui permet de réduire directement les pointes de charge et de faire fonctionner le réseau de chaleur à des températures plus basses. Le projet SHAKE souligne l'importance primordiale de l'isolation des bâtiments pour réussir la transition vers des réseaux de chaleur à basse température.

1.2.2 Radiateurs, chauffage par le sol et adaptations de systèmes

Lorsque les températures d'alimentation sont réduites, les émetteurs du bâtiment doivent être compatibles. Les radiateurs à plus grande surface ou à chauffage par le sol optimisé pour les basses températures sont mieux adaptés à une alimentation à basse température. Dans la planification de la rénovation, le dimensionnement des radiateurs, les mises à niveau des vannes thermostatiques et les changements de collecteurs sont évalués afin d'assurer des températures intérieures adéquates à des températures d'entrée plus basses.

1.2.3 Rénovation du système à tuyau unique

Dans les systèmes à tuyau unique, le même débit d'eau passe par plusieurs radiateurs en séquence, comme on le voit à la figure 5. Bien que rentables à installer, ces systèmes sont notoirement difficiles à réguler. Selon l'époque et la conception spécifique du bâtiment, on rencontre généralement quatre configurations principales. Dans les systèmes à tuyau unique, le même débit d'eau passe par plusieurs radiateurs en séquence. Bien que rentables à installer, ces systèmes sont notoirement difficiles à réguler. Selon l'époque et la conception spécifique du bâtiment, on rencontre généralement quatre configurations principales

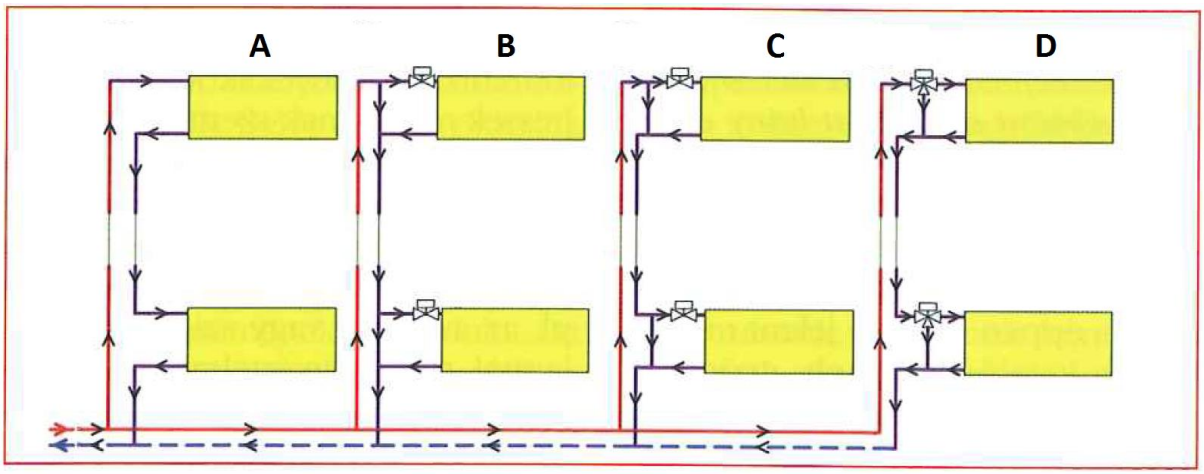


Figure 5. Options de rénovation pour les systèmes de chauffage à tuyau unique côté radiateur [6]

Type A – Chauffage en circulation directe (monotube) : Il s'agit de la forme la plus simple et la plus ancienne. La totalité du débit massique d'eau traverse chaque radiateur de la colonne. Si un résident ferme son radiateur — ce qui est souvent physiquement impossible sans dérivation (bypass) — l'ensemble de la colonne cesse de fonctionner.

Type B – Radiateur avec dérivation (bypass) : Une conduite de dérivation permet à une partie de l'eau de contourner le radiateur. Cela permet une régulation de base de la température sans interrompre la circulation de l'eau vers les autres appartements.

Type C – Dérivation décalée avec clapet anti-retour : Il s'agit d'une version plus avancée dans laquelle la géométrie de la dérivation et un clapet spécifique permettent de favoriser la circulation de l'eau à travers le radiateur ou, au contraire, par la dérivation.

Type D – Dérivation décalée avec vanne trois voies : Il s'agit de la configuration historique la plus sophistiquée. Elle permet un mélange proportionnel précis entre le débit passant par la dérivation et celui traversant le radiateur, améliorant ainsi le confort thermique.

1.2.4 Le défi du déséquilibre hydraulique

Un obstacle majeur dans ces systèmes réside dans l'équilibrage des pressions hydrauliques. Dans un grand ensemble résidentiel, les lois de la dynamique des fluides créent naturellement une certaine « iniquité » dans la distribution de la chaleur :

Le problème de proximité : Les colonnes de chauffage situées à proximité de la pompe de circulation centrale reçoivent naturellement un débit massique plus élevé, car le trajet hydraulique présentant le moins de résistance est plus court.

Surdébit contre sous-débit : Comme l'illustre la figure 6, les colonnes « proches » bénéficient d'une performance thermique plus élevée (surdébit), ce qui entraîne des appartements excessivement chauds et des températures de retour élevées, réduisant ainsi l'efficacité de l'ensemble de l'installation de chauffage urbain. À l'inverse, les colonnes « éloignées » souffrent d'un débit plus faible et d'une sous-alimentation persistante, laissant les résidents de ces zones dans des logements insuffisamment chauffés.

Bien que l'utilisation de pompes à fréquence variable (VFD) soit devenue une nécessité dans les systèmes modernes — permettant d'adapter la vitesse de la pompe en fonction de la demande globale — une pompe intelligente ne peut, à elle seule, corriger un réseau déséquilibré. Elle peut modifier la pression totale du système, mais elle ne peut pas garantir que cette pression soit répartie équitablement entre la première et la dernière colonne.

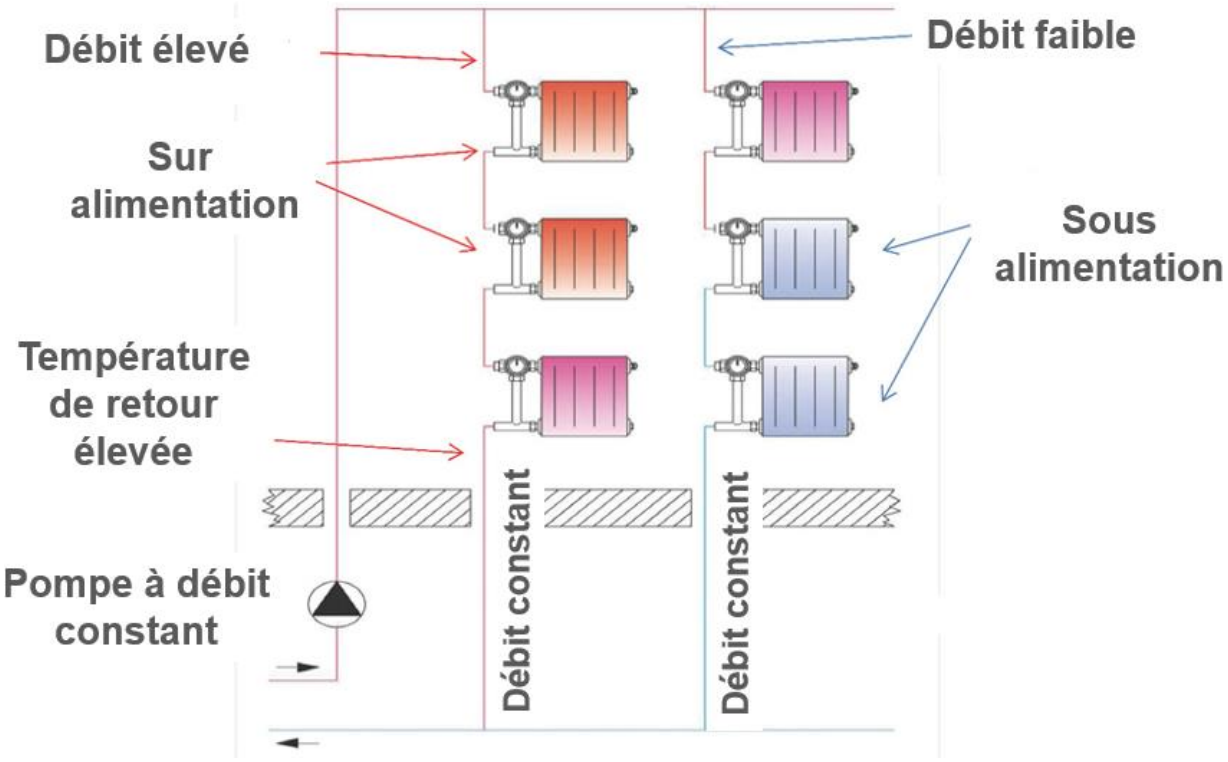


Figure 6. L'absence d'égalisation de pression des circuits hydrauliques [7]

1.2.5 La solution : Équilibrage au niveau des colonnes

La clé d'une rénovation réussie est l'installation de vannes d'équilibrage pour chaque colonne individuelle, comme illustré à la figure 7. Cette intervention transforme un réseau chaotique en un réseau géré à trois fonctions principales :

- Compensation de pression : Les vannes d'équilibrage créent une résistance artificielle dans les colonnes « proches », forçant l'eau à atteindre les points les plus éloignés du réseau. Cela élimine l'effet de « raccourci ».
- Définition du débit : Les ingénieurs peuvent définir et verrouiller le débit exact requis pour chaque colonne, garantissant que chaque appartement reçoive la chaleur requise, quel que soit son emplacement.
- Mesure et diagnostic : Les vannes d'équilibrage modernes fournissent un point de mesure. Cela permet aux techniciens de vérifier en temps réel les différences réelles de débit et de pression, passant de la performance « estimée » à l'efficacité « mesurée ».

En mettant en œuvre ces ajustements au niveau du bâtiment, la température de retour de l'ensemble du réseau de chauffage urbain peut être réduite, ce qui constitue la condition fondamentale pour intégrer les énergies renouvelables et réduire les coûts opérationnels.

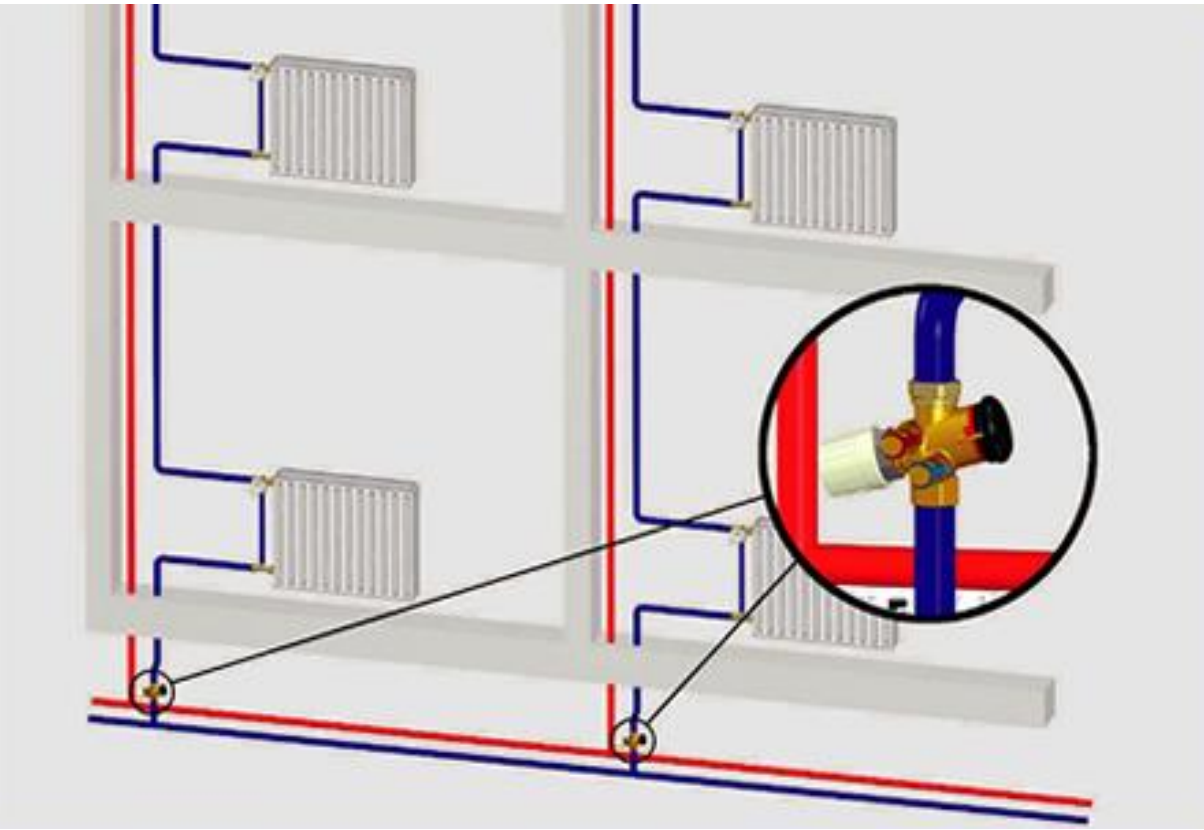


Figure 7. Équilibrage au niveau des colonnes montantes [8]

1.3 Modernisation des postes de transformation et solutions par appartement

1.3.1 Rénovation du RCU dans des lotissements résidentiels

1.3.1.1 Le passage aux postes compacts et modulaires

Dans la 2e génération de systèmes de chauffage urbain, les postes étaient généralement construits in situ (sur site). Cela nécessitait une main-d'œuvre importante, des tuyauteries sur mesure, et entraînait des systèmes difficiles à standardiser ou à maintenir. Les projets de rénovation modernes utilisent désormais une technologie de 3e génération, caractérisée par des postes préfabriqués et modulaires, comme on le voit à la figure 8.

Ces unités sont testées en usine et arrivent sous forme de solutions « plug-and-play », disponibles à différents niveaux de performance pour répondre aux besoins spécifiques d'un bâtiment. Une sous-station modulaire moderne intègre généralement tous les composants critiques dans un seul châssis compact :

- Échangeurs de chaleur à plaques: Offrant une grande efficacité thermique et un transfert de chaleur rapide.
- Pompes à fréquence variable : Ajustant automatiquement le débit en fonction de la demande en temps réel pour économiser de l'électricité.
- Soupapes de réglage des performances : Assurer un contrôle précis du milieu thermique.
- Réservoirs d'expansion : Gestion sécurisée des fluctuations de pression à l'intérieur du système.



Figure 8. Sous-station compacte et modulaire [18]

1.3.1.2 Sous-stations au niveau des appartements : confort individualisé

Le plus grand saut en matière de satisfaction des résidents et d'efficacité du système vient de l'installation de sous-stations par appartement (figure 9). L'une des caractéristiques les plus impressionnantes de ces unités est leur conception compacte. Elles sont souvent assez fines pour être installées dans une simple cavité murale de 150 mm, ce qui les rend idéales pour une adaptation dans les bâtiments « panneaux » plus anciens où l'espace est limité. Les principaux avantages pour les residents sont :

- Contrôle individuel : Les résidents peuvent démarrer ou arrêter leur saison de chauffage de manière indépendante et ajuster la température de leur eau chaude sanitaire (ECS) selon leurs préférences.
- Comptage transparent : La consommation de chaleur et d'eau est mesurée par appartement, garantissant que les résidents ne paient que pour ce qu'ils utilisent réellement, ce qui encourage intrinsèquement des comportements d'économie d'énergie.
- Stabilité hydraulique : Chaque poste dispose d'un contrôle différentiel de pression, empêchant les fluctuations du réseau d'affecter le niveau de confort à l'intérieur de l'appartement.



Figure 9. sous-station d'appartement [9]

1.3.1.3 Hygiène améliorée et simplicité du système

Au-delà du confort, les sous-stations à l'échelle de l'appartement modifient fondamentalement la manière dont l'eau est gérée. Les systèmes traditionnels nécessitent un circuit de circulation continu d'ECS afin de garantir la disponibilité instantanée de l'eau chaude au robinet ; toutefois, ces circuits sont connus pour leurs pertes thermiques importantes.

Comme les sous-stations d'appartement produisent l'eau chaude à la demande au moyen d'un échangeur de chaleur local, le circuit de circulation d'ECS n'est plus nécessaire. Cette solution présente deux avantages majeurs :

Efficacité énergétique : La suppression de la boucle de circulation réduit considérablement les pertes thermiques en régime de veille dans l'ensemble du bâtiment.

Santé et sécurité : En supprimant la nécessité de recourir à de grands ballons de stockage d'ECS et à de longues canalisations de circulation, le système réduit fortement le risque de contamination par les légionelles. Comme l'eau n'est pas stockée à une température tiède, mais chauffée uniquement au moment où elle est nécessaire, le système est intrinsèquement plus hygiénique.

1.3.2 Transition vers le chauffage urbain à basse température (RCU-BT)

La transition vers le chauffage urbain à basse température (RCU-BT), souvent appelée la 4e génération, représente un changement de paradigme fondamental dans la manière dont nous distribuons l'énergie. Contrairement aux systèmes anciens qui reposaient sur la vapeur à haute pression ou l'eau bouillante, le RCU-BT fonctionne avec des températures d'alimentation généralement comprises entre 35°C et 70°C, et dans certains réseaux expérimentaux ultra-basses températures, jusqu'à 30°C. En maintenant des températures de retour entre 20°C et 40°C, le système crée un gradient thermique beaucoup plus faible avec l'environnement environnant. Ce changement technique n'est pas simplement une amélioration progressive ; il est la condition préalable à un secteur énergétique entièrement décarboné, car il permet au réseau d'agir comme un « bus thermique » flexible capable de capter l'énergie de sources auparavant considérées comme inutilisables.

Le principal facteur justifiant l'abaissement de ces niveaux de température réside dans la réduction considérable des pertes thermiques lors de la distribution. Dans les réseaux traditionnels à haute température, l'écart important entre la température des canalisations et celle du sol entraîne une dissipation énergétique significative, qui peut être atténuée dans une certaine mesure par l'isolation des canalisations. En rapprochant la température de départ de la température ambiante du sol, ces pertes sont minimisées, ce qui permet au système de conserver une efficacité élevée, même lorsqu'il dessert des zones moins densément peuplées. Cette efficacité est encore renforcée par les conceptions modernes des infrastructures, qui privilégient des diamètres de canalisations plus faibles et des sections de réseau décentralisées. Des canalisations de plus petit diamètre permettent non seulement de réduire la surface disponible pour les pertes de chaleur, mais aussi de diminuer les coûts d'investissement et l'emprise physique du réseau, facilitant ainsi son intégration dans le « tissu urbain existant » lors des projets de rénovation.

L'un des aspects les plus transformateurs des réseaux de chaleur urbains à basse température (RCU-BT) réside sans doute dans leur capacité à intégrer des sources d'énergie renouvelables et des sources de chaleur à faible exergie. Les systèmes à haute température sont essentiellement « verrouillés » sur des sources de chaleur fondées sur la combustion, telles que les chaudières au charbon ou au gaz, car il est énergétiquement coûteux d'élever la température d'une chaleur renouvelable au-delà de 100 °C. À l'inverse, un RCU-BT est parfaitement adapté à la chaleur produite par de grandes pompes à chaleur, les réservoirs géothermiques et les installations solaires thermiques. Il permet également de récupérer la chaleur fatale industrielle, ainsi que des sources de chaleur à basse température provenant de sources non conventionnelles telles que les centres de données, les réseaux d'assainissement ou les grandes installations de réfrigération commerciales. L'exploitant du réseau de chaleur devient ainsi un véritable orchestrateur énergétique, capable d'équilibrer un portefeuille diversifié de sources de chaleur renouvelables, réduisant ainsi de manière significative l'empreinte carbone de l'ensemble du parc immobilier.

Cependant, la mise en œuvre réussie des réseaux de chaleur urbains à basse température est indissociable de la performance énergétique des bâtiments qu'ils desservent. Les RCU-BT sont particulièrement efficaces lorsqu'ils sont associés à des bâtiments neufs à haute performance énergétique ou à des bâtiments anciens ayant fait l'objet d'une rénovation énergétique approfondie. Pour qu'un bâtiment reste confortable lorsqu'il est alimenté par une eau à 45 °C au lieu de 90 °C, il est indispensable d'agir sur l'efficacité du côté de la demande. Cela implique généralement d'améliorer l'enveloppe du bâtiment grâce à une isolation renforcée et de moderniser les émetteurs de chaleur secondaires — par exemple en installant

des radiateurs de plus grande dimension ou un chauffage par le sol — afin de maximiser la surface d'échange thermique. Une fois les « fuites thermiques » du bâtiment réduites, le besoin d'un apport de chaleur à forte intensité disparaît, permettant à l'ensemble du système de fonctionner à un niveau énergétique plus faible et plus durable.

Enfin, la gestion d'un équilibre thermique aussi sophistiqué et sensible nécessite de s'éloigner de la logique de régulation traditionnelle consistant à « régler et oublier ». Les systèmes RCU-BT modernes s'appuient sur des systèmes de régulation intelligents et une surveillance en temps réel afin d'ajuster en permanence la fourniture de chaleur en fonction de la demande réelle et des prévisions météorologiques. Grâce à l'utilisation de jumeaux numériques et de capteurs avancés installés aussi bien au niveau de la centrale que des appartements, les exploitants peuvent s'assurer que chaque kilowatt de chaleur est fourni exactement là où et au moment où il est nécessaire. Ce niveau de précision permet d'éviter les surdébits et les températures de retour élevées qui caractérisaient les systèmes plus anciens, garantissant ainsi que la transition vers un fonctionnement à basse température tienne ses promesses en matière de résilience, de maîtrise des coûts et de durabilité environnementale pour l'avenir urbain.

1.3.3 Considérations techniques dans la transition

1.3.3.1 Systèmes d'approvisionnement et modifications du réseau

Le passage vers des opérations basse température est géré le plus efficacement par une baisse progressive des températures du réseau. Au lieu d'une chute à l'échelle du système, les opérateurs établissent souvent des zones pilotes ou des boucles secondaires où de nouvelles technologies peuvent être testées sans risquer la stabilité de l'ensemble du réseau. Cette approche progressive permet l'intégration progressive des concepts de chauffage urbain (RCU) de 4e ou 5e génération. Alors que les systèmes de 4e génération se concentrent sur l'eau basse température (environ 55−70°C), les systèmes de 5e génération (souvent appelés boucles ambiantes) fonctionnent près de la température du sol, utilisant des pompes à chaleur décentralisées dans chaque bâtiment pour fournir le dernier regain de température. La modernisation des sources de production est centrale dans ce changement, s'éloignant des chaudières à haute combustion vers des pompes à chaleur compatibles basse température et des unités de récupération de chaleur résiduelle compatibles avec basse température, qui prospèrent dans ces régimes thermiques plus bas.

1.3.3.2 Adaptations au niveau des bâtiments et le défi ECS

Pour qu'un bâtiment reste fonctionnel sous un régime de basse température, il faut repenser l'infrastructure de chauffage interne. Traditionnellement, les radiateurs étaient conçus pour 90°C d'eau ; à 50°C, leur production de chaleur diminue considérablement. Pour compenser, la rénovation doit se concentrer sur l'amélioration de l'enveloppe thermique — en modernisant fenêtres, murs et toits — afin de réduire la charge thermique globale. Lorsque le bâtiment perd moins de chaleur, les radiateurs existants ou les systèmes de chauffage par le sol peuvent fonctionner efficacement même avec des températures d'entrée plus basses. De plus, les échangeurs de chaleur de la sous-station doivent être spécifiquement sélectionnés pour bien fonctionner à un ΔT plus faible, assurant un transfert d'énergie maximal même lorsque la différence de température entre les circuits primaire et secondaire est minime.

L'un des obstacles techniques les plus critiques est la préparation de l'eau chaude sanitaire (ECS). Puisque les températures d'alimentation en RCU-BT peuvent descendre en dessous des 55−60°C nécessaires pour éliminer instantanément les bactéries, la gestion du risque de Legionella est primordiale. Cela est souvent résolu par des stratégies décentralisées, comme

l'utilisation de chauffages d'amplification (électriques ou pompes à chaleur à petite échelle) pour fournir un dernier relevage thermique à l'eau au point d'utilisation. Alternativement, des stratégies de pasteurisation ou des échangeurs de chaleur « instantanés » à haute efficacité dans les sous-stations d'appartements peuvent être utilisées pour garantir que l'eau ne soit jamais stockée à des températures tièdes et à risque, éliminant ainsi le danger biologique sans nécessiter que tout le réseau fonctionne à haute température.

1.3.3.3 Contrôle, optimisation et réseaux intelligents

Comme les systèmes basse température fonctionnent avec des marges de température bien plus faibles, il y a moins de « marge d'erreur » dans la distribution de la chaleur. Cela nécessite des stratégies de contrôle plus précises que celles utilisées dans les systèmes hérités. Les réseaux modernes intègrent des thermostats intelligents et une logique de compensation météorologique, ce qui permet au système d'anticiper les variations de température extérieure et d'ajuster le débit avant même que les résidents ne ressentent le froid. Cette évolution est renforcée par l'intégration en temps réel de la réponse à la demande, où le réseau peut « communiquer » avec les bâtiments pour réduire les charges de pointe, garantissant que l'offre est toujours optimisée par rapport à la consommation réelle du tissu urbain.

1.3.3.4 Maintenance et surveillance prédictives

Dans un réseau modernisé de chauffage urbain, la maintenance passe d'un modèle réactif « réparation à la panne » à une approche proactive et prédictive de maintenance. Étant donné que ces systèmes représentent d'importants investissements en capital, garantir la fiabilité et l'efficacité à long terme sont essentielles pour la viabilité économique. En intégrant un réseau dense de capteurs et d'analyses de données, les opérateurs peuvent surveiller en temps réel l'état de l'infrastructure.

Des technologies avancées, telles que les capteurs acoustiques et la surveillance des flux thermiques, permettent la détection précoce des défauts — tels que des fuites mineures ou la dégradation de l'isolation — bien avant qu'ils ne deviennent des ruptures catastrophiques. Cette supervision basée sur les données réduit non seulement les coûts élevés d'entretien et les factures de réparation d'urgence, mais garantit également que le réseau continue de fonctionner à son efficacité maximale en conception, préservant les bénéfices environnementaux et économiques de la rénovation pour les décennies à venir.

1.3.4 Mesure et facturation de la consommation de chaleur

Pour qu'un système de chauffage urbain fonctionne efficacement, il doit aller au-delà de la simple livraison de chaleur vers une mesure sophistiquée de la consommation de chaleur. Ce processus nécessite un ensemble coordonné de composants travaillant en tandem pour calculer l'énergie réellement extraite par un bâtiment ou un appartement individuel. Un ensemble de mesure moderne standard (visible à la figure 10) se compose de plusieurs éléments de haute précision :

- Un capteur de flux : Pour mesurer le volume exact du milieu porteur de chaleur traversant le système.
- Thermomètres d'alimentation et de retour : Enregistrer la différence de température (ΔT) entre l'eau entrant et sortant du circuit du consommateur.

- Un ordinateur de traitement : Le « cerveau » central qui intègre les données de débit et de température pour calculer l'énergie thermique totale consommée, généralement mesurée en kilowattheures (kWh) ou gigajoules (GJ).

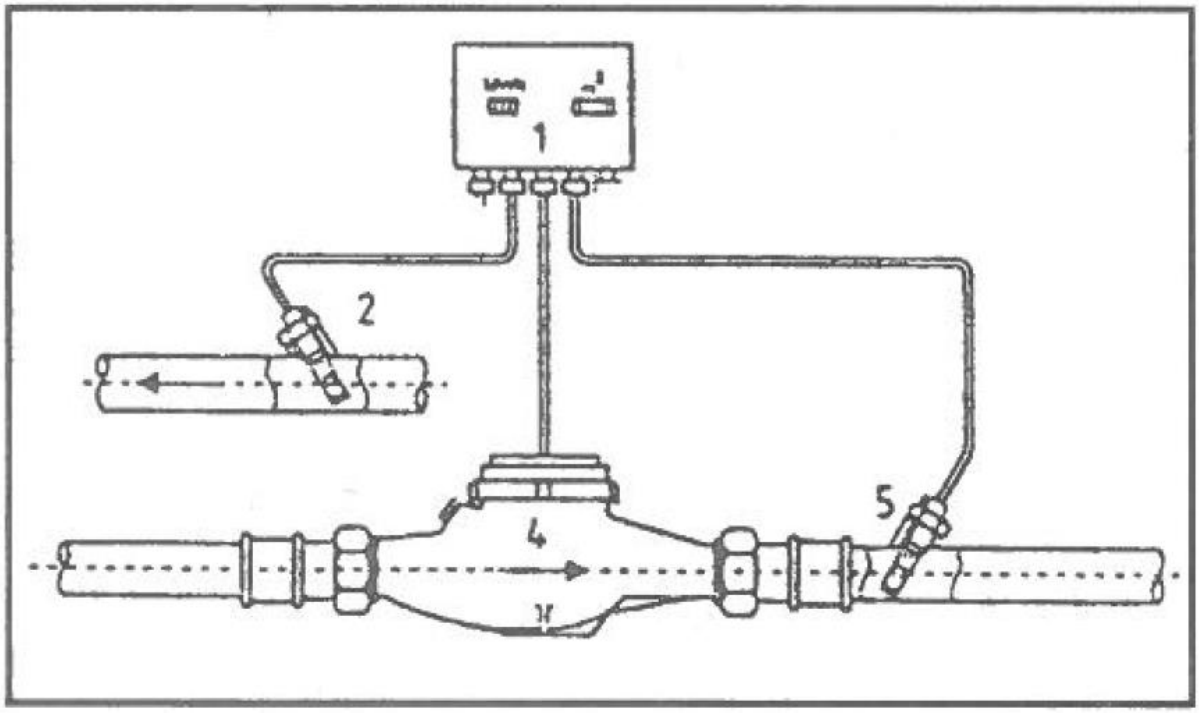


Figure 10. Compteur de consommation de chaleur [10]

1.3.4.1 Structures de mesure hiérarchique

Les projets de rénovation modernes permettent de mesurer la consommation de chaleur à différents niveaux du tissu urbain. Si la mesure centralisée de la consommation de chaleur à l'échelle de l'ensemble du bâtiment demeure la norme pour la facturation globale, une approche plus fine est nécessaire pour assurer une répartition équitable des coûts. Selon l'architecture du bâtiment et les exigences de gestion, la mesure peut être organisée par :

- Bâtiment entier (point de connexion principal)
- Parties spécifiques du bâtiment (par exemple, ailes séparées ou unités commerciales au rez-de-chaussée)
- Appartements individuels (assurant une responsabilité directe des résidents)
- Par site de consommation (radiateurs individuels ou zones spécifiques)

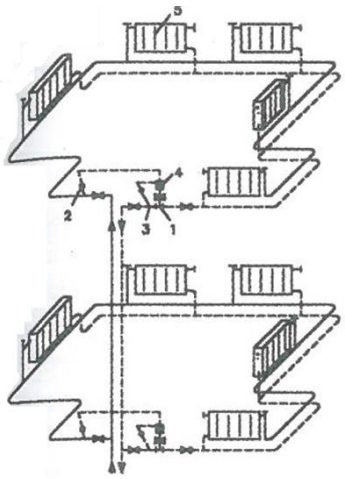


Figure 11. Exemple de mesure d'appartement [10]

1.3.4.2 Le défi des systèmes à simple tuyau vs. à double tuyau

La facilité de mise en œuvre d'un compteur individuel est largement dictée par la canalisation interne du bâtiment. Dans les systèmes à double tuyau, où chaque appartement dispose d'un point d'entrée et de sortie clair et unique pour son circuit de chauffage, le comptage individuel est facilement réalisable. Cela permet l'installation d'un seul compteur au niveau de l'appartement qui fournit des données de facturation très précises.

En revanche, les systèmes traditionnels à tuyau unique présentent un obstacle technique important. Parce qu'un seul tuyau vertical (colonne) dessert souvent des pièces dans plusieurs appartements différents, il est physiquement impossible d'installer un seul compteur qui capture la consommation totale d'un appartement spécifique. Dans ces lotissements anciens, la rénovation nécessite souvent l'utilisation de répartiteurs de coûts de chauffage montés sur des radiateurs individuels ou, plus idéalement, la conversion complète du réseau interne en un système de distribution horizontal basé sur un appartement afin de répondre aux standards actuels de facturation.

1.4 Modèles économiques et aspects économiques du chauffage urbain

Le cadre financier et structurel d'un système de chauffage urbain (RCU) est aussi crucial que sa conception technique. Parce que ces systèmes nécessitent un capital initial massif, leur succès dépend d'une planification à long terme, d'un financement stable et d'un modèle économique alignant les intérêts de l'exploitant sur les objectifs de la communauté.

1.4.1 Modèles économiques courants

La manière dont un système RCU est détenu et exploité influence considérablement ses priorités stratégiques, de la neutralité carbone à la tarification à la consommation.

Modèle de services publics : Prédominant dans les pays nordiques comme le Danemark et la Suède, ces systèmes appartiennent aux municipalités. L'objectif principal est l'abordabilité, la sécurité énergétique et l'atteinte des objectifs climatiques locaux. Les bénéfices sont généralement réinvestis dans les infrastructures ou utilisés pour réduire les tarifs pour les résidents.

Modèle des services publics privés : Courants dans les marchés énergétiques libéralisés, ils sont exploités par des entreprises privées axées sur la rentabilité et l'efficacité opérationnelle. Bien qu'ils apportent du capital privé, ils peuvent nécessiter des incitations gouvernementales

ou des réglementations strictes pour garantir des investissements à long terme dans la décarbonation plutôt que des gains à court terme.

Partenariat public-privé (PPP) : Ce modèle vise à équilibrer l'intérêt public avec l'efficacité du secteur privé. En partageant la propriété et les risques, le secteur public peut atteindre des objectifs sociaux et environnementaux tout en tirant parti de l'investissement privé et de l'expertise en gestion grâce à des contrats basés sur la performance.

Modèle coopératif : Dans cette approche centrée sur la communauté, les utilisateurs finaux possèdent eux-mêmes le système. Les bénéfices sont soit partagés, soit réinvestis pour améliorer le service. Ce modèle est particulièrement efficace dans les petites municipalités et les « éco-villages », car il favorise une forte acceptation locale et une grande transparence.

1.4.2 Flux de revenus et structures de coûts

Bien que la vente de chaleur aux bâtiments reste la principale source de revenus, les systèmes modernes de RCU diversifient leurs revenus. Les exploitants explorent de plus en plus des services auxiliaires, tels que la flexibilité du réseau électrique en utilisant des pompes à chaleur à grande échelle ou un stockage thermique. De plus, les subventions gouvernementales, les tarifs d'achat pour la chaleur verte et les crédits carbone dans le cadre des systèmes de distribution de quotas (ETS) fournissent un soutien financier vital à la transition des combustibles fossiles.

Côté dépenses, l'OPEX inclut le coût des carburants (le cas échéant), l'électricité pour le pompage et la maintenance continue. Dans un réseau rénové et à basse température, ces coûts sont nettement inférieurs à ceux des systèmes anciens, car les pertes de chaleur sont minimisées et la dépendance aux combustibles fossiles coûteux diminuée.

1.4.3 Tarification de la chaleur et tarifs motivationnels

Les modèles tarifaires sont conçus pour être « représentatifs des coûts », tout en garantissant que la chaleur reste abordable. La plupart des structures tarifaires reposent sur une part fixe, destinée à couvrir les coûts liés aux infrastructures et à la maintenance, et une part variable, fondée sur la consommation réelle d'énergie, mesurée en MWh ou en GJ.

Un outil essentiel dans la gestion moderne des RCU est le tarif motivationnel. Cette structure pénalise les consommateurs qui retournent l'eau au réseau à des températures excessivement élevées. En créant une incitation financière pour les résidents et les gestionnaires d'immeubles afin d'optimiser leurs systèmes secondaires internes, l'opérateur peut abaisser la température de retour de l'ensemble du réseau, qui est l'exigence fondamentale pour l'efficacité à l'échelle du système.

1.4.4 Transition vers le « chauffage en tant que service »

L'avenir de l'économie RCU évolue vers des contrats basés sur la performance et des modèles orientés service. Dans le modèle Heat-as-a-Service, les clients ne paient pas pour des unités d'énergie, mais pour un niveau de confort garanti (par exemple, une température intérieure constante de 21°C). Cela modifie l'incitation : le fournisseur réalise désormais plus de profits en rendant le bâtiment plus efficace et en consommant moins d'énergie. Combinés à

l'intégration Digital et Smart RCU, ces modèles permettent une tarification dynamique et une réponse à la demande, transformant le réseau de chauffage en un service hautement optimisé et convivial pour les consommateurs.

1.5 Développement RCU : Impliquant les centres-villes

1.5.1 Réseau de chauffage et d'électricité Bunhill, Londres [11]

Le réseau de chauffage et d'électricité de Bunhill dans le borough londonien d'Islington constitue un jalon mondial de l'innovation énergétique urbaine, voir figure 12. C'est le premier projet au monde à exploiter avec succès la chaleur résiduelle d'un réseau de métro — le métro de Londres — afin de fournir un chauffage abordable et à faible émission de carbone pour les habitants locaux et les bâtiments publics.

1.5.1.1 Phases

Phase 1 : Création de la Fondation

Lancée comme solution énergétique décentralisée, la phase 1 était centrée sur une centrale thermique et électrique combinée (CHP) au gaz située sur Central Street. Dans cette configuration, la chaleur résiduelle produite comme sous-produit de la production d'électricité était captée et réutilisée pour le chauffage urbain plutôt que dissipée dans l'atmosphère. Cette phase initiale a établi l'infrastructure du réseau, desservant environ 800 foyers et plusieurs bâtiments publics locaux.

Phase 2 : Pionnier de la récupération de la chaleur résiduelle

L'extension de la phase 2 représente un bond technologique significatif vers les principes du chauffage urbain de 4e génération évoqués précédemment. Le cœur de cette extension est un nouveau centre énergétique construit sur le site d'une galerie de ventilation du métro londonien, à l'angle de Moreland Street et Central Street.

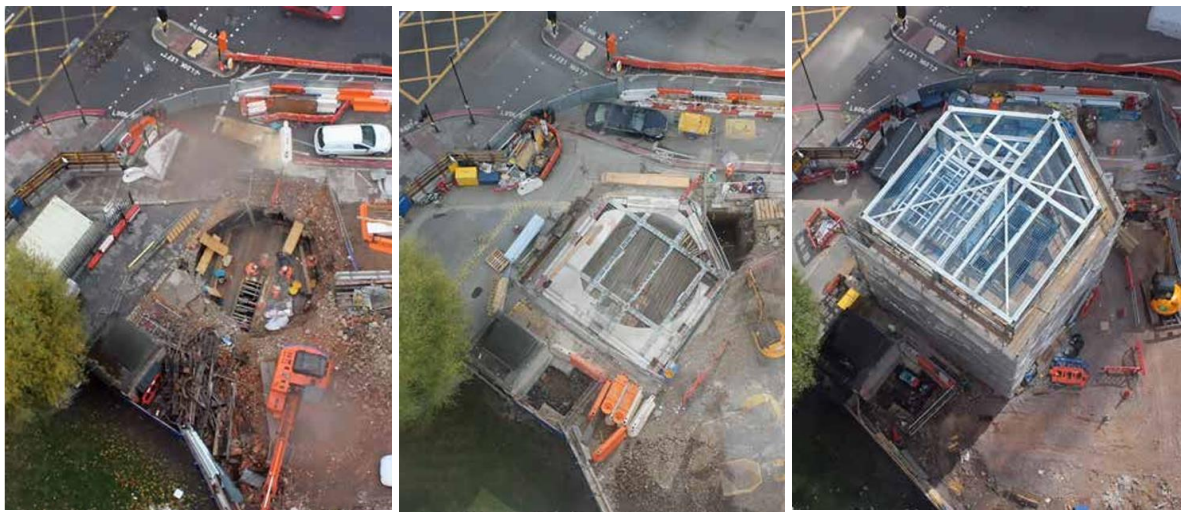


Figure 12. Phases de construction du réseau de chaleur et d'électricité de Bunhill à Londres [11]

Cette installation utilise une pompe à chaleur de grande puissance (figure 13) pour extraire directement la chaleur résiduelle de faible qualité du système de ventilation du tube. En «

améliorant » cet air chaud des tunnels en énergie thermique utilisable pour le réseau de chauffage à base d'eau, le projet démontre comment les villes peuvent transformer une nuisance (chaleur de tunnel) en une ressource précieuse.

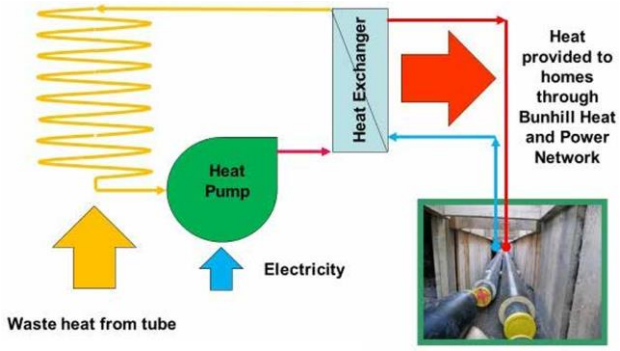


Figure 13. Schéma du chauffage urbain à pompe à chaleur [11]



Figure 14. Bâtiments alimentés par deux centres de chauffage [11]



Figure 15. Ventilateur de conduit de ventilation (gauche) et stockage d'énergie thermique (droite) [11]

1.5.1.2 Résilience du système et impact environnemental

Un avantage technique clé de la rénovation et de l'expansion de Bunhill est l'interconnexion entre les deux centres énergétiques (figure 14). La conception assure une grande résilience du système ; si une installation nécessite maintenance ou tombe en panne, l'autre peut

prendre en charge la charge, assurant ainsi un approvisionnement continu en chaleur pour la communauté.

L'impact de cette expansion est considérable :

- Portée élargie : L'extension de la phase 2 relie 550 propriétés supplémentaires, dont le domaine King Square et l'école Moreland, portant la portée totale du service à plus de 1 350 foyers.
- Réduction du carbone : En adoptant la technologie de pompe à chaleur et la récupération de la chaleur résiduelle, cette extension devrait réduire les émissions de carbone d'environ 500 tonnes de CO2 par an.
- Intégration urbaine : Le projet montre comment le chauffage urbain peut être réaménagé avec succès dans un centre-ville dense et historique en réutilisant des infrastructures existantes comme les conduits de ventilation.

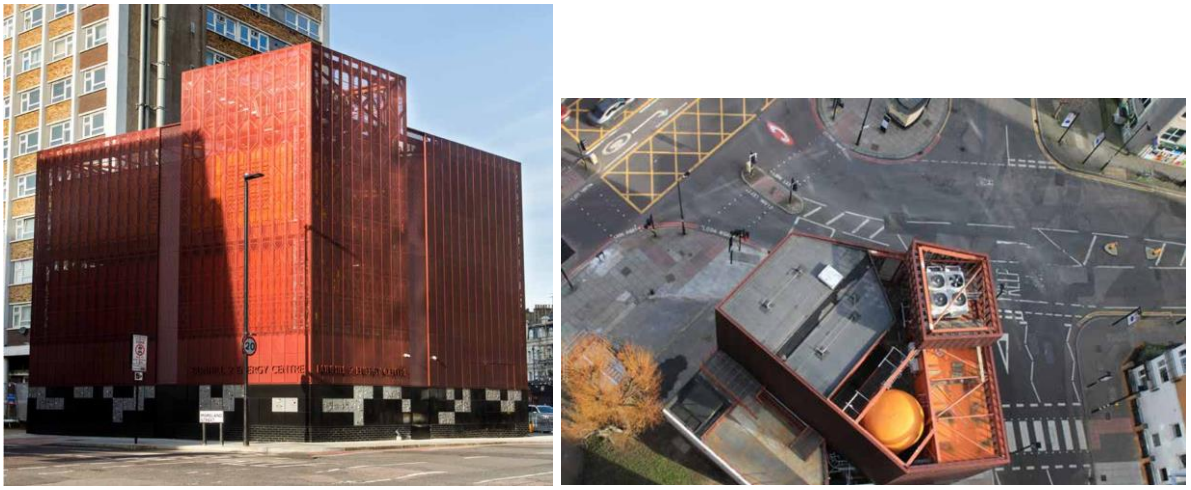


Figure 16. Le centre de chauffage après rénovation [11]

1.5.2 Projet Citigen, Londres [12]

Le projet Citigen, situé au cœur du quartier financier londonien, représente une évolution sophistiquée des systèmes énergétiques urbains. Alors que de nombreux réseaux traditionnels reposent sur une seule source d'énergie, Citigen agit comme un pôle énergétique multi-vecteurs, intégrant chauffage, refroidissement et production d'énergie dans un réseau unifié et à haute efficacité.

1.5.2.1 Exploitation de l'aquifère de Londres

Une pierre angulaire de la modernisation de Citigen est l'installation d'un système de pompe à chaleur de 4 MW qui exploite une ressource urbaine cachée : l'aquifère de Londres, voir figure 17. En utilisant trois forages forés à 200 mètres sous la surface, le système puise la chaleur naturelle du sol, qui reste stable à une moyenne de 14°C. Cette énergie géothermique est ensuite « améliorée » par les pompes à chaleur pour fournir le chauffage des espaces et l'eau chaude.

Au-delà de l'extraction géothermique, le système est conçu pour être très circulaire. Il recycle activement la chaleur résiduelle provenant de l'électricité locale et de la production de refroidissement — une énergie qui serait autrement gaspillée et évacuée dans l'atmosphère.

Cette approche à double source fournit une capacité de chauffage suffisante pour répondre à la demande d'environ 2 300 foyers ou entreprises tout en ajoutant simultanément 2,8 MW de nouvelle capacité de refroidissement pour le quartier d'affaires environnant.

1.5.2.2 Flexibilité et équilibrage de la grille

L'une des caractéristiques techniques les plus avancées du projet Citigen est son accent sur la flexibilité opérationnelle. Le centre énergétique abrite un immense réservoir thermique de 320 000 litres. Cette « batterie thermique » remplit plusieurs fonctions essentielles :

Pic de réduction : En stockant de l'eau chaude lors des périodes de faible demande, le système peut répondre aux pics de forte demande sans surcharger les centrales de production de chaleur.

Intégration du réseau : La capacité de stockage permet à Citigen d'agir comme un outil d'équilibrage pour le réseau électrique plus large. Lorsqu'il y a un excès d'énergie renouvelable disponible sur le réseau national (par exemple, lors de journées très venteuses ou ensoleillées), le projet peut utiliser cet excédent d'électricité pour faire fonctionner ses pompes à chaleur et stocker la chaleur résultante pour une utilisation ultérieure.

Cette synergie entre les réseaux thermique et électrique transforme le réseau de chauffage urbain d'un service public passif en un participant actif à la transition énergétique plus large, maximisant l'utilisation des ressources renouvelables tout en assurant la fiabilité de la City de Londres.

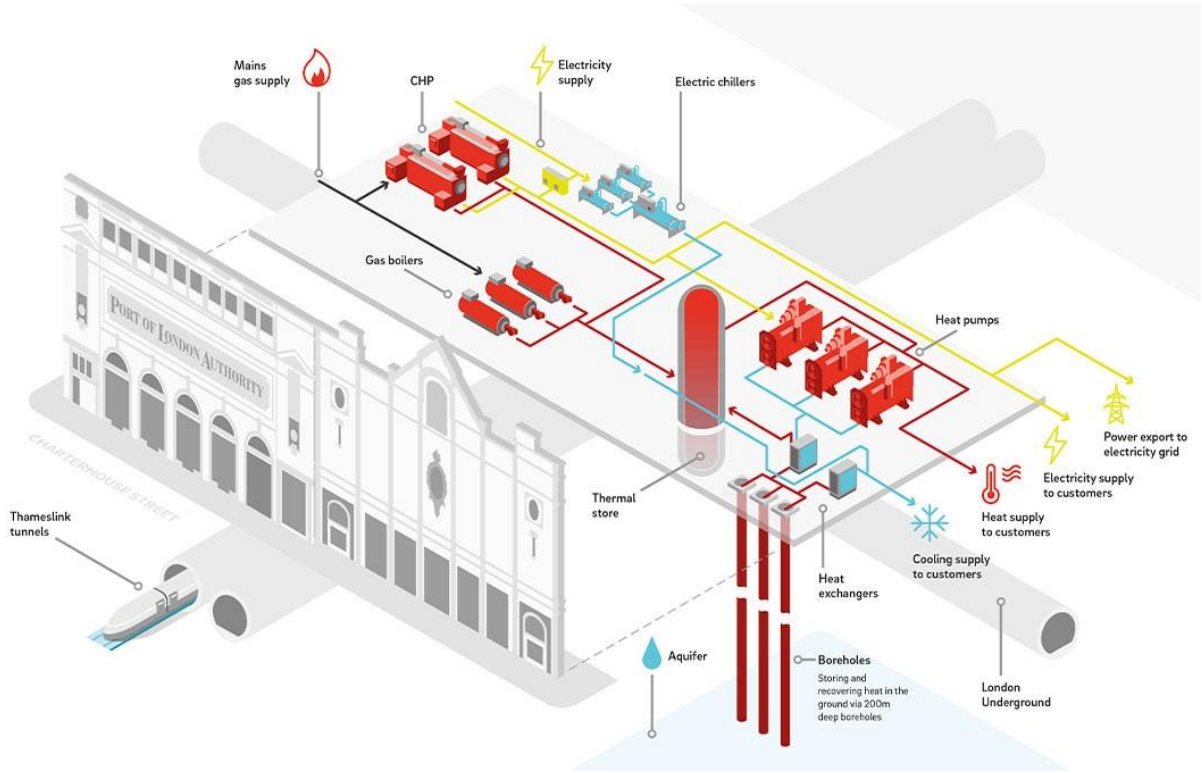


Figure 17. Fonctions implémentées dans Citigen [12]

1.5.3 Réseau énergétique décentralisé de Somers Town, Londres [13]

Le Réseau énergétique décentralisé de Somers Town fournit un plan stratégique pour la manière dont les autorités locales peuvent gérer les incertitudes liées à la rénovation par une mise en œuvre progressive. Ce réseau fournit chauffage et eau chaude à cinq lotissements, un nouveau centre communautaire et à l'école Edith Neville, tout en fournissant simultanément de l'électricité à l'Institut Francis Crick via un câble privé.

1.5.3.1 Une approche progressive et basée sur les données

Reconnaissant le défi des données opérationnelles historiques limitées, le Conseil a opté pour une solution progressive afin d'assurer l'efficacité du système. En reliant les premiers lotissements avant la dimension finale de l'usine, les ingénieurs pouvaient étudier les tendances réelles de la demande et les performances. Cela a permis de sélectionner une taille de moteur à Chauffage et Énergie Combinée (CHP) correspondant précisément aux besoins réels du réseau, plutôt que de se fier à des estimations théoriques.

Première phase : Cette phase initiale a impliqué l'installation du réseau central de chauffage urbain reliant quatre lotissements. Une innovation clé durant cette phase a été le centre énergétique de rénovation, qui a été intégré de manière créative au sous-sol d'un parking sous-utilisé des années 1960, démontrant le potentiel de réaffectation des vides urbains existants.

Deuxième phase : Après l'analyse des données opérationnelles de la phase 1, la deuxième phase a vu l'installation du moteur de CHP optimisé et des réserves thermiques. Cette phase a également élargi la portée du réseau pour inclure un bloc de logements supplémentaire, le centre communautaire et l'école.

1.5.3.2 Leçons des rénovations du centre-ville de Londres

Le projet Somers Town, aux côtés de Bunhill et Citigen, met en lumière plusieurs points essentiels pour le développement du chauffage urbain :

- Réutilisation créative des infrastructures : Qu'il s'agisse d'utiliser des conduits de ventilation du métro londonien (Bunhill), des aquifères profonds (Citigen) ou des parkings sous-sols sous-utilisés (Somers Town), la rénovation repose sur l'adaptation astucieuse des caractéristiques urbaines existantes.
- Atténuation des risques par phases : En particulier dans les zones résidentielles aux systèmes hérités imprévisibles, un déploiement progressif permet une optimisation basée sur les données qui évite la surdimensionnement et l'exploitation inefficace.
- Intégration intersectorielle : Relier la demande de chaleur résidentielle aux besoins électriques de grands partenaires institutionnels comme le Francis Crick Institute crée un écosystème économique et technique plus solide.

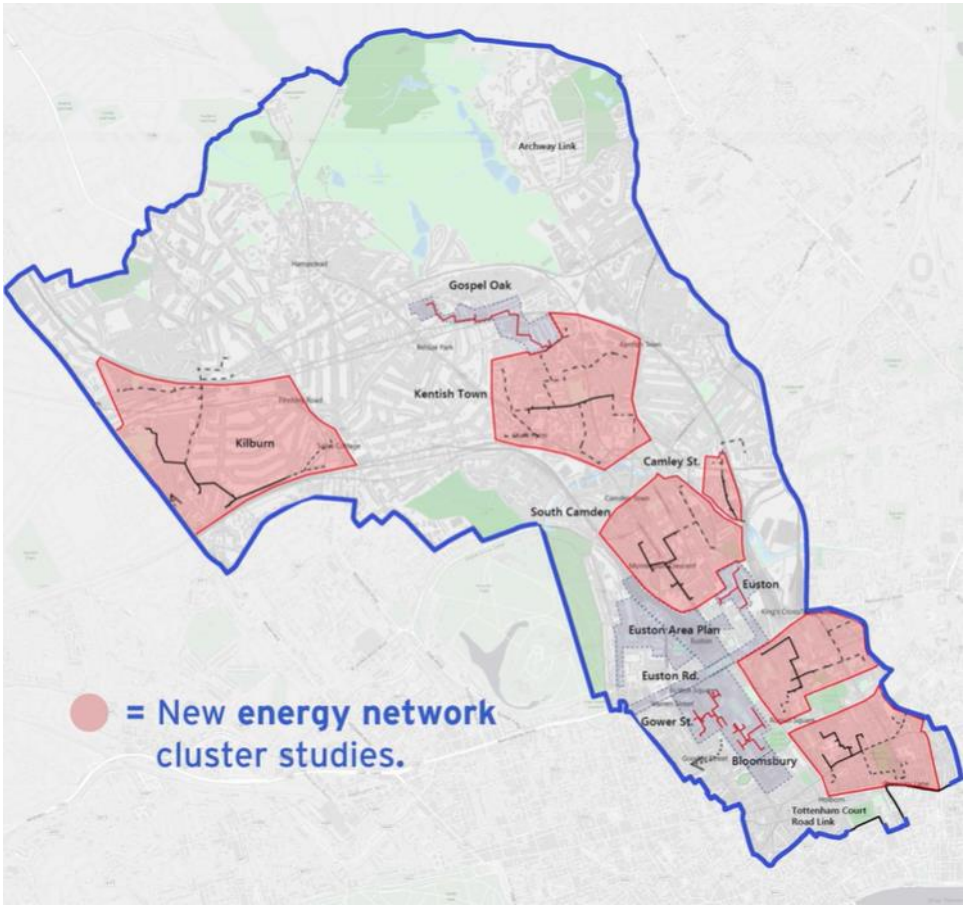


Figure 18. Réseau énergétique décentralisé de Somers Town [13]

1.5.4 Développement du chauffage et du refroidissement urbain de Paris [14]

Le paysage énergétique de Paris (visible à la figure 19) est défini par deux grands réseaux interconnectés : la CPCU (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain) pour le chauffage et la Fraicheur de Paris pour le refroidissement. Ces réseaux démontrent comment les zones métropolitaines à haute densité peuvent réaliser d'énormes économies d'échelle tout en diversifiant leur portefeuille énergétique pour inclure des sources renouvelables et récupérées.

1.5.4.1 Le réseau de chauffage CPCU

Le réseau CPCU est un vaste projet d'infrastructure s'étendant sur environ 475 km et produisant environ 5 500 GWh/an de chaleur. Son impact social et institutionnel est profond, car il dessert l'équivalent de 500 000 foyers, dont : 100 % des hôpitaux de la ville, garantissant ainsi une alimentation en chaleur fiable et efficace aux infrastructures de santé critiques. Environ 50 % des logements sociaux. Environ 50 % des bâtiments publics.

Le réseau repose sur un mélange diversifié d'installations de production d'énergie réparties dans toute la région métropolitaine. Cela inclut des incinérateurs de déchets appartenant à SYCTOM, ainsi que des usines de production géothermique, une usine de biomasse, des centrales de chauffage et d'énergie combinées (CHP), et des centrales thermiques dédiées appartenant à CPCU. Cette diversification permet à la ville de réorienter sa charge de base vers des sources plus écologiques comme la valorisation des déchets et la géothermie, à

mesure de sa modernisation. Cependant, le réseau fait face à de nouveaux défis, étant ancien et alimenté à la vapeur, la distribution doit également être rénovée.

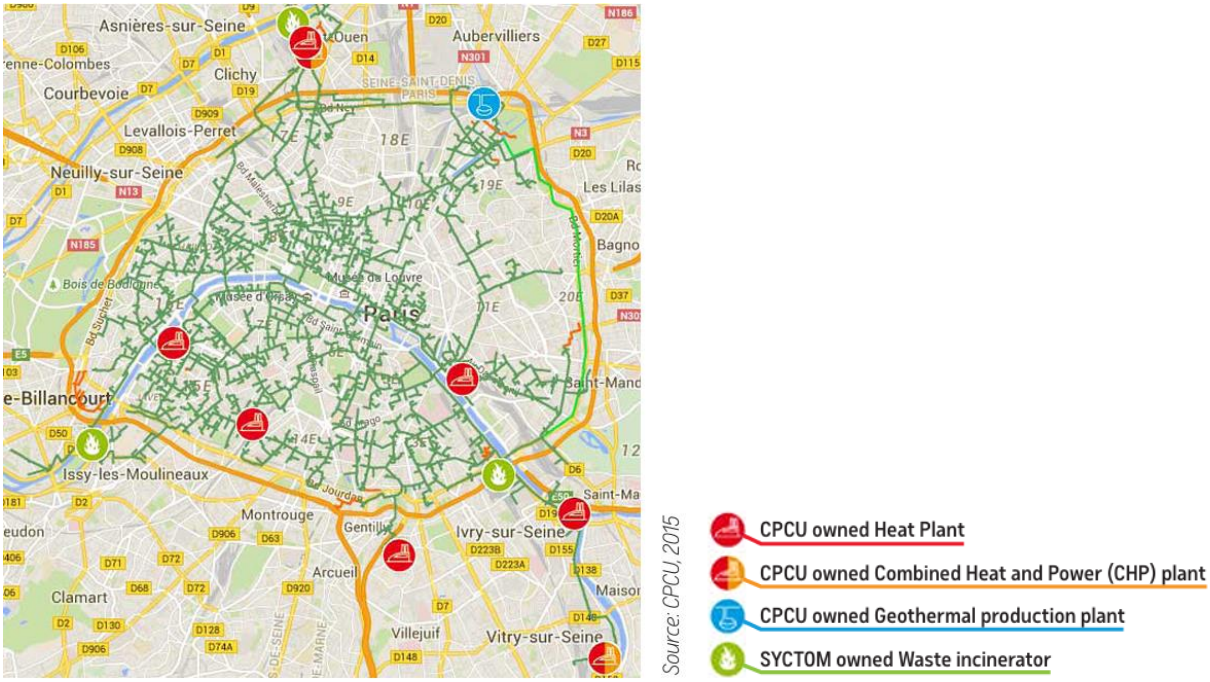


Figure 19. Carte du chauffage urbain à Paris [14]

1.5.4.2 Fraicheur de Paris District Cooling

Complétant le réseau de chauffage, on trouve la Fraicheur de Paris, l'un des plus grands réseaux de refroidissement urbain au monde, voir figure 20. Avec une capacité de refroidissement de 330 MW et une production annuelle d'environ 412 GWh/an, ce réseau de 71 km assure un service essentiel aux centres commerciaux et culturels de la ville.

Une innovation technique clé dans le système de refroidissement parisien est l'utilisation de l'eau de la Seine pour le « refroidissement gratuit » dans certaines usines de production. En exploitant la capacité thermique naturelle du fleuve, le système réduit considérablement l'électricité nécessaire pour les refroidisseurs pendant les mois les plus frais. Le réseau utilise également de grands réservoirs thermiques pour gérer la demande maximale, similaire aux stratégies observées dans le projet Citigen de Londres, garantissant que le réseau reste équilibré et efficace lors des vagues de chaleur.

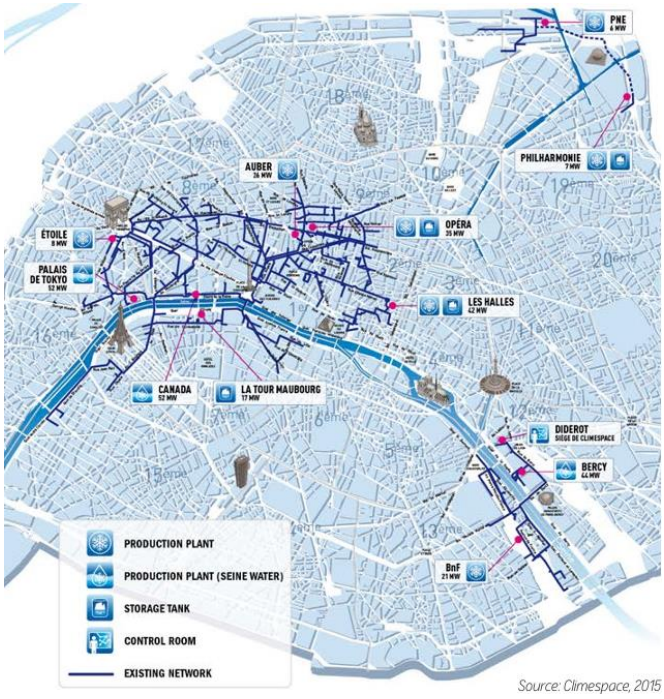


Figure 20. Carte du refroidissement urbain à Paris [14]

1.5.5 Réseau d'eau potable comme source de chaleur, Copenhague [15]

Dans la recherche de sources de chaleur durables et à faible exergie, la ville de Copenhague a étudié un concept novateur : utiliser le réseau de distribution d'eau potable (DWDN) comme réservoir thermique pour le chauffage urbain. Cette approche considère les canalisations d'eau de la ville comme une source de chaleur basse température, où l'énergie thermique est extraite via de grandes pompes à chaleur pour soutenir le réseau de chauffage, comme illustré à la figure 21.

1.5.5.1 Performance technique et couplage système

Le potentiel d'extraction de chaleur de l'infrastructure d'eau potable de Copenhague est estimé à environ 21 MW. En intégrant des pompes à chaleur dans la conduite d'approvisionnement en eau, le système peut capter l'énergie thermique ambiante stockée dans l'eau, voir figure 22. Cependant, le projet souligne la distinction cruciale entre l'efficacité des composants et l'efficacité globale du système :

COP de pompe à chaleur : Les pompes à chaleur individuelles atteignent un coefficient de performance (COP) respectable entre 2,8 et 3,2.

COP système : En tenant compte des pertes de distribution, des pressions réseau et du besoin potentiel de réchauffement, le COP à l'échelle du système tombe à environ 1,7.

Cette disparité suggère que, bien que la technologie soit viable, utiliser un réseau d'eau potable comme source principale de chaleur n'est pas toujours avantageux sur le plan thermodynamique par rapport à d'autres sources de chaleur résiduelle. Le coût énergétique élevé du maintien de l'équilibre thermique de l'eau potable l'emporte souvent sur les gains de la chaleur extraite.

1.5.5.2 Avantages saisonniers et gestion thermique

Malgré les défis d'efficacité, le système offre des avantages secondaires uniques à la gestion municipale. Pendant les mois d'été, l'extraction de chaleur du réseau d'eau potable a une double fonction. En extrayant l'énergie de l'eau pour fournir de l'eau chaude domestique via le réseau de chauffage urbain, la température de l'approvisionnement en eau potable est abaissée. Cela aide à maintenir la qualité et la fraîcheur de l'eau potable dans les canalisations, réduisant ainsi le risque de prolifération microbienne qui peut survenir lorsque les canalisations souterraines sont réchauffées par le sol urbain environnant.

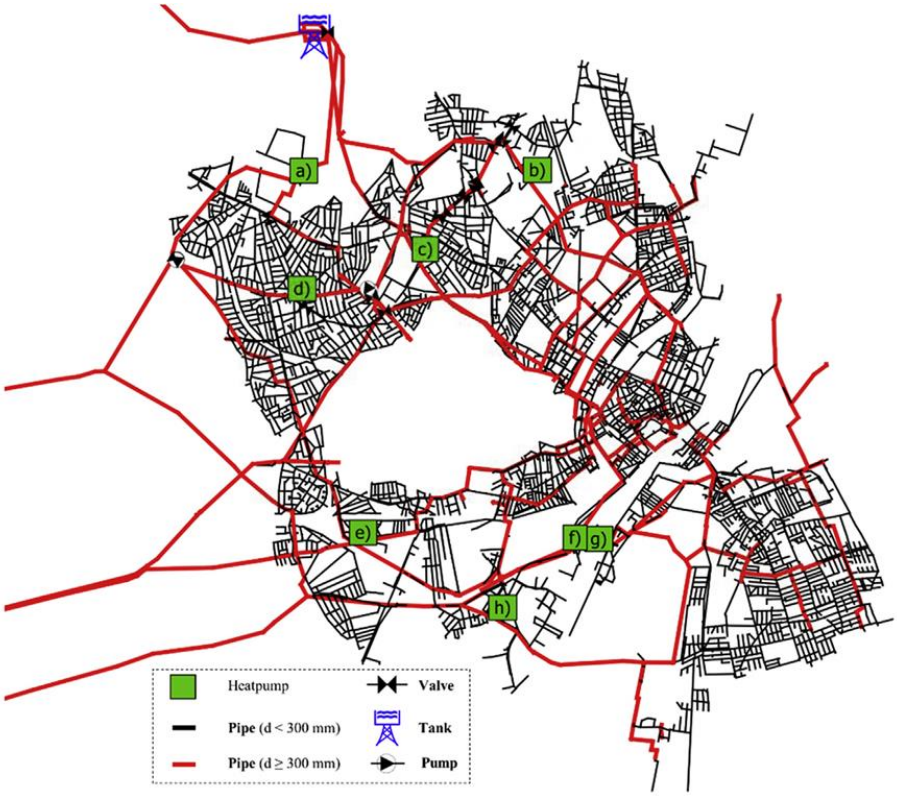


Figure 21. Carte des pompes à chaleur installées dans le système de chauffage urbain de Copenhague [15]

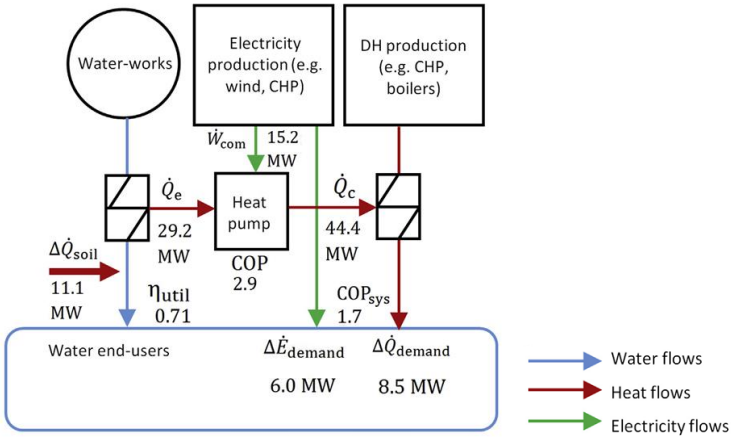


Figure 22. Modèle de système énergétique avec pompes à chaleur d'eau potable [15]

1.5.6 Chauffage urbain dynamiquement distribué, Helsinki [16]

Helsinki est pionnière dans une stratégie hybride visant à faire progressivement la transition progressive de son vaste système de chauffage urbain (RCU) de 3e génération vers des opérations de 4e génération à basse température. Plutôt que de tenter une conversion massive et à haut risque de l'ensemble du réseau en même temps, la ville utilise une approche dynamiquement distribuée. Cette méthode se concentre sur l'« islanding » de sous-zones spécifiques, leur permettant de fonctionner de manière indépendante tout en maintenant une connexion stratégique au réseau central.

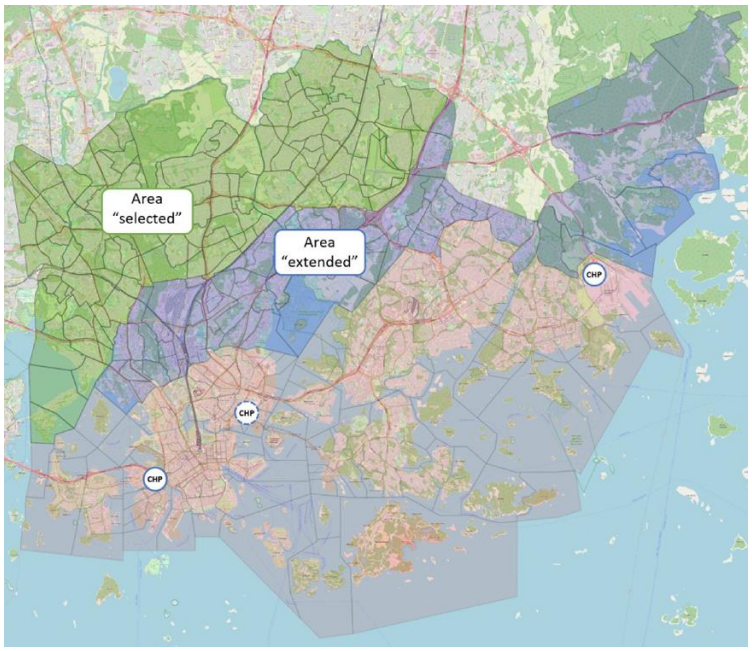


Figure 23. Zones incluses dans l'évaluation du concept de chauffage urbain dynamiquement distribué (« sélectionné » et « étendu »), avec les principaux sites d'alimentation RCU marqués sous forme de petits cercles [16]

1.5.6.1 La stratégie de l'« islandage » modulaire

Les principaux facteurs de cette transition sont le stockage et l'isolation, qui offrent la flexibilité et la résilience nécessaires dans un environnement urbain complexe. Selon ce modèle, les sous-zones peuvent être déconnectées du réseau principal pendant la haute saison de chauffage pour fonctionner comme des « îlots » localisés. Ces îlots dépendent de leur propre approvisionnement réparti en chaleur et de stockage local, bien qu'ils puissent toujours puiser dans le réseau central si la demande locale dépasse la capacité.

Les principaux éléments techniques de cette stratégie incluent :

- Stockage saisonnier important : Ces systèmes sont essentiels à la viabilité des sous-zones insulaires. Ils sont rechargés pendant les mois d'été, lorsque la chaleur est abondante et bon marché, puis évacués pour fournir de la chaleur pendant les mois d'hiver plus froids.
- Réduction du stress central : Parce que les zones insulaires peuvent fonctionner de manière indépendante, elles soulagent significativement la pression sur le réseau central lors de situations de forte charge, améliorant ainsi la stabilité globale de l'infrastructure énergétique de la ville.

- Performance contextuelle : Le succès de cette approche dépend fortement des conditions locales, telles que la disponibilité de la chaleur estivale excessive et l'efficacité économique des technologies spécifiques de stockage et de génération distribuée utilisées dans cette zone.

1.5.6.2 Approvisionnement thermique futur : petits réacteurs modulaires (SMR)

Dans le cadre de son plan de décarbonation à long terme, Helsinki explore l'intégration de petits réacteurs modulaires (SMR) dans son mix d'alimentation thermique. Comme le montre le graphique d'approvisionnement projeté ci-dessous, les SMR pourraient finalement fournir une charge de base stable et sans carbone pour le système de chauffage urbain de la ville.

Cette vision future combine la production d'énergie à haute densité des SMR avec la flexibilité des pompes à chaleur (HP), des chaudières à biomasse et du stockage thermique existant afin d'assurer un approvisionnement en chaleur fiable et durable toute l'année.

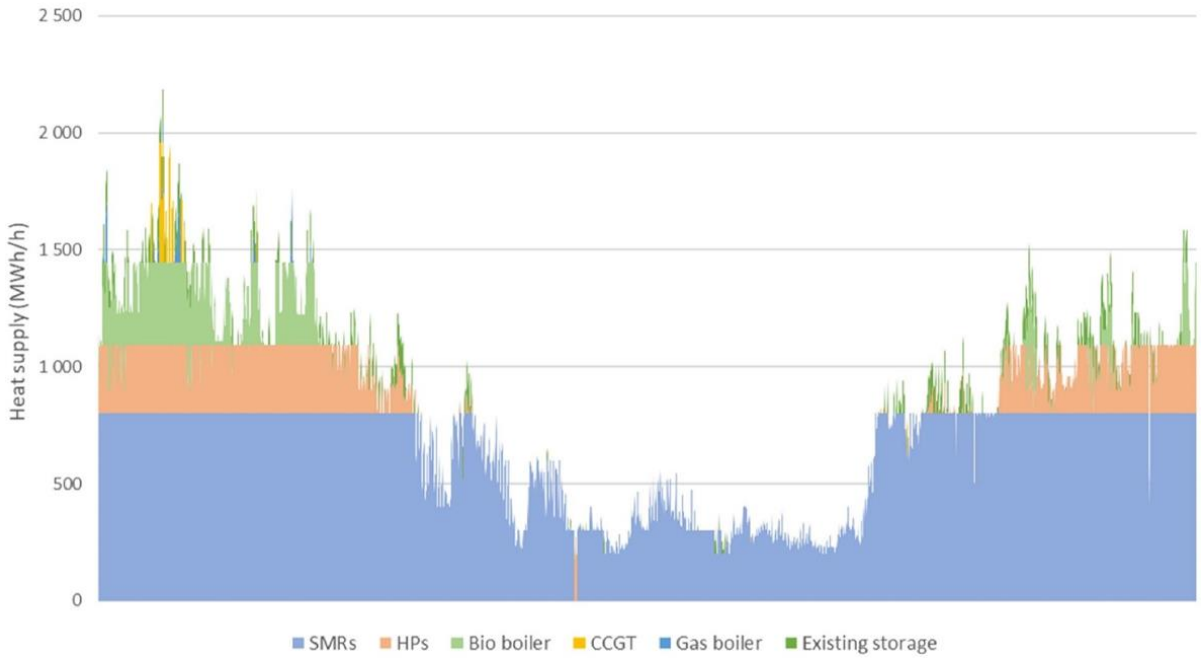


Figure 24. Alimentation thermique du système existant avec trois unités SMR en charge de base, correspondant à un scénario de référence sans stockage de chaleur spécifique à une zone inclus [16]

Bibliographie

[1] https://dunaujvarosmesel.hu/2023/02/03/vakolokanal-helyett-toronydaru

[2] https://www.moksha.hu/utazas/pimp-my-pipe-szinezz-tavho-vezeteket#google_vignette

[3] https://www.directindustry.com/prod/hrs-heat-exchangers/product-90471-1637343.html

[4] https://www.hullokft.hu/my-portfolio/hocserelo-javitas/.

[5] Kiss Róbert, Távhőellátási zsebkönyv, Budapest. Műszaki Könyvkiadó, 1997.

[6] K. György, "Panelkorszerűsítés gyakorlati szemmel II.," *Magyar Installateur,* vol. 10, 2014.

[7] https://www.proidea.hu/termekalkalmazasok-5/oventrop-haromjaratu-szelep-futotestkotes-10582.shtml.

[8] https://www.proidea.hu/termekalkalmazasok-5/oventrop-haromjaratu-szelep-futotestkotes-10582.shtml.

[9] https://designcenter.danfoss.com/products/climate-solutions-for-heating/stations/direct-heating-and-instantaneous-dhw/termix-vmtd-f-b

[10] Horváth Gábor, A hőfogyasztásmérés elmélete és gyakorlata, Budapest: Sontex, 2008.

[11] www.islington.gov.uk.

[12] https://www.eonenergy.com/business/why-eon/case-studies/citigen.html?utm.

[13] https://www.vitalenergi.co.uk/case-studies/somers-town-decentralised-energy-network.

[14] https://urban-leds.org/wp-content/uploads/2019/resources/case_studies/ICLEI_cs_Paris-case-study.pdf.

[15] H. Hubeck-Graudal, J. Kjeld Kirstein, T. Ommen, M. Rygaard and B. Elmegaard, "Drinking water supply as low-temperature source in the district heating system: A case study for the city of Copenhagen," *Energy,* vol. 194, 2020.

[16] M. Rämä, E. Pursiheimo, D. Sundell and R. Abdurafikov, "Dynamically distributed district heating for an existing system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 189, 2024.

[17] https://www.decentralized-energy.com.

[18] www.szovatherm.hu