SHaKE
Sharing Knowledge on Energy Communities

Co-funded by the European Union

Module 1

Introduction aux réseaux de chaleur urbains

Partie 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 : 1.1
Date : mai 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

Projet n° : 2023-1-HU01-KA220-HED-000160219

Auteurs

Balázs Bokor, Zoltán Takács
Université de Technologie et d'Économie de Budapest

Rédacteurs en chef

Eva Szalma, 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 :

Budapest University of Technology and Economics. Module 1 : Introduction aux systèmes de chauffage urbain. Projet SHaKE, 2026.https ://www.shakeproject-dhc.eu/

Guide pour utiliser le module 1

Ce module fait partie du programme éducatif SHaKE développé pour soutenir l'enseignement des réseaux de chaleur et de froid (DHC) dans l'enseignement supérieur et la formation professionnelle.

Le module 1 propose une introduction complète aux systèmes de chauffage urbain et à leur rôle dans les communautés énergétiques durables. Il introduit le développement historique du chauffage urbain, des premiers réseaux à vapeur aux systèmes modernes de partage d'énergie de basse température et de cinquième génération. Le module explique les principaux composants du système, notamment la production, la distribution, le transfert, la consommation et les sous-stations de chauffage urbain, tout en mettant en lumière les avantages et les défis de l'approvisionnement centralisé en chaleur.

Une attention particulière est portée à l'intégration des sources de chaleur renouvelables et alternatives, notamment l'énergie géothermique, l'énergie solaire thermique, les technologies de conversion des déchets en énergie et la récupération de la chaleur résiduelle. Des exemples européens sont utilisés pour illustrer comment les systèmes de chauffage urbain peuvent soutenir la transition vers des systèmes énergétiques urbains à faible émission de carbone.

Le guide est principalement destiné à être une ressource pédagogique réutilisable pour les enseignants et formateurs. Il peut être utilisé pour soutenir des conférences, des activités d'apprentissage mixte, des discussions en classe, des travaux pratiques, des travaux d'introduction à des cas et une formation professionnelle continue. Les diapositives de présentation associées, la banque de questions, le quiz d'auto-évaluation, la vidéo du module et les exercices pratiques 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. En tant que module d'introduction, il convient aux apprenants débutants dans les systèmes de chauffage urbain, ainsi qu'à ceux qui souhaitent revoir la terminologie de base, la structure du système et le développement technologique du chauffage urbain avant de passer aux modules SHaKE plus spécialisés.

Principaux sujets abordés dans le module

- Les systèmes de chauffage urbain et leur rôle dans l'approvisionnement énergétique urbain
- Avantages et inconvénients du chauffage urbain
- Production de chaleur et approvisionnement centralisé en chaleur
- Chauffage urbain en Europe
- Développement historique et générations de chauffage urbain
- Systèmes de distribution de vapeur de première génération
- Systèmes de distribution d'eau chaude de deuxième génération
- Systèmes de distribution d'eau chaude de troisième génération
- Chauffage urbain intelligent à basse température de quatrième génération
- Communautés énergétiques de cinquième génération à température ambiante
- Sous-systèmes fonctionnels des réseaux de chauffage urbain
- Postes de transformation en chauffage urbain et types de connexions hydrauliques
- Technologies d'échangeurs de chaleur dans les sous-stations
- Intégration des énergies renouvelables dans le chauffage urbain
- Énergie géothermique et énergie solaire thermique
- Conversion des déchets en énergie dans le chauffage urbain
- Récupération de la chaleur résiduelle provenant de l'industrie, des centres de données et des infrastructures municipales
- Tendances futures des réseaux de chauffage urbain de quatrième et cinquième génération
- Considérations politiques et économiques pour un développement durable du chauffage urbain

Résultats d'apprentissage du module 1

Le module est conçu pour soutenir le développement des compétences suivantes :

- comprendre le développement historique et l'évolution des systèmes de chauffage urbain, des réseaux à vapeur de première génération aux communautés énergétiques de cinquième génération ;
- identifier les principaux composants et sous-systèmes des réseaux de chauffage urbain, notamment la production, la distribution, le transfert, la consommation et les postes de chauffage ;
- comparer différentes technologies et générations de chauffage urbain en termes d'efficacité, de températures de fonctionnement, d'infrastructures et d'intégration des énergies renouvelables ;
- évaluer les avantages, les limites et les impacts durables des systèmes de chauffage urbain dans différents contextes régionaux et urbains ;
- analyser le rôle des sources d'énergie renouvelable, de la récupération de la chaleur usée et des communautés énergétiques dans le soutien à la transition vers des systèmes de chauffage urbain à faible émission de carbone ;
- Appliquer les concepts d'introduction au chauffage urbain à un scénario pratique de planification municipale.

Charge de travail estimée

Ce module représente environ 6,7 heures d'apprentissage, incluant des cours, des exercices, des études de cas, de l'auto-apprentissage et de l'évaluation.

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'introduction complète à l'enseignement,
- un ensemble de documents de cours sélectionnés,
- un composant d'apprentissage hybride,
- un ensemble d'exercices pratiques,
- un module préparatoire avant des modules SHaKE plus spécialisés,
- ou une ressource complémentaire pour les cours existants.

Activités et heures d'apprentissage

Type d'activité	Répartition du temps	Description
Conférences	3 h	Introduction aux systèmes de chauffage urbain, avantages et inconvénients, production et sources de chaleur, contexte européen, générations de chauffage urbain, sous-stations, sources de chaleur renouvelable, valorisation des déchets et récupération de la chaleur résiduelle
Exercices	0,5 h	Activité pratique basée sur la comparaison des productions de chauffage urbain, l'évaluation des sources de chaleur renouvelables et alternatives, et la préparation d'une recommandation pour un scénario de modernisation du chauffage municipal
Études de cas	0,5 h	Discussion des exemples européens et réels liés au chauffage urbain géothermique, à la valorisation des déchets, à la récupération de la chaleur résiduelle et aux concepts de communauté de l'énergie

Auto-apprentissage	1,5 h	Lecture indépendante, révision des sections du guide, préparation au quiz d'auto-évaluation et révision des concepts clés du module
Évaluation	0,2 h	Questions d'évaluation à choix multiples évaluant la compréhension des principaux concepts, technologies et applications du chauffage urbain
Total des heures d'apprentissage	**6,7 h**	

Groupes cibles

Ce guide est principalement destiné aux 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 :

- des enseignants d'enseignement supérieur en ingénierie, services du bâtiment, systèmes énergétiques, chauffage urbain et systèmes énergétiques urbains durables ;
- des formateurs impliqués dans la formation professionnelle ou continue sur le chauffage urbain et les systèmes énergétiques urbains ;
- les enseignants développant des activités d'apprentissage mixtes, modulaires ou axées sur la pratique ;
- le personnel enseignant à la recherche de ressources pédagogiques réutilisables sur les systèmes énergétiques durables des districts ;
- formateurs et conférenciers travaillant sur des sujets liés au chauffage urbain, à l'intégration de la chaleur renouvelable, aux communautés énergétiques, aux sous-stations et aux infrastructures énergétiques urbaines.

Les matériaux peuvent également être utilisés par des étudiants, des professionnels et des apprenants indépendants souhaitant étudier individuellement certains sujets. Comme il s'agit d'un module d'introduction, aucune connaissance préalable du chauffage urbain n'est requise, bien qu'une connaissance de base des services de construction, de la thermodynamique ou des systèmes énergétiques soit utile.

Utilisation recommandée par les éducateurs et les formateurs

Le module 1 peut être utilisé de manière flexible comme unité d'introduction 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 1**
Introduction du sujet	Utilisez l'aperçu du module et les diapositives introductives pour présenter le concept de base du chauffage urbain et sa pertinence pour les systèmes énergétiques urbains durables.
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 principes, avantages et inconvénients du chauffage urbain, la production de chaleur, le contexte

	européen, les générations, les sous-stations, les sources de chaleur renouvelable et la récupération de la chaleur résiduelle.
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 du raisonnement appliqué	Utilisez cet exercice pratique pour le travail en classe, les activités de groupe, les devoirs ou de courts rapports écrits sur la modernisation du chauffage urbain.
Soutien à la discussion sur le développement durable	Utilisez les sections sur les énergies renouvelables, la valorisation des déchets, la récupération de la chaleur résiduelle et les communautés énergétiques de cinquième génération pour lancer une discussion sur la décarbonation et les futurs systèmes de chauffage 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, diapositives, questions et exercices du guide 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.

Pas	Activité suggérée
Révisez la présentation introductive	Familiarisez-vous avec les concepts principaux, la terminologie et la structure des systèmes de chauffage urbain.
Étudiez les documents du guide	Lisez les explications des principes du chauffage urbain, des générations de systèmes, des sous-stations, des sources de chaleur renouvelable et de la récupération de la chaleur résiduelle.
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 pratique	Appliquez les connaissances acquises en comparant les technologies de chauffage urbain et les sources de chaleur dans un scénario de modernisation d'un réseau municipal.
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 sur les 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 pratique téléchargeable basé sur un scénario de modernisation du chauffage municipal ;
- Questions d'évaluation conçues pour soutenir l'auto-apprentissage, la discussion en classe et l'évaluation formative.

L'exercice pratique peut être utilisé pour le travail de groupe, les devoirs, de courts rapports écrits, des discussions en classe ou des apprentissages initiatifs par projets. Il invite les apprenants à comparer les générations de chauffage urbain, à évaluer les sources de chaleur renouvelables et alternatives, et à formuler une recommandation pour une municipalité souhaitant moderniser son infrastructure de chauffage.

1 Table des matières

1 Table des matières 8

1 Introduction aux réseaux de chaleur urbains 10

1.1 Avantages et inconvénients des réseaux de chauffage urbain 10

1.2 Production et sources de chaleur 11

1.3 Réseaux de chaleur en Europe 11

2 Développement historique : générations de RCU 12

2.1 Première génération : Distribution à vapeur 13

2.2 Deuxième génération : distribution d'eau chaude 13

2.3 Troisième génération : Distribution de l'eau chaude 13

2.4 Quatrième génération : Chauffage urbain intelligent à basse température 13

2.5 Cinquième génération : Communautés énergétiques à température ambiante 13

3 Sous-systèmes et technologies de réseaux de chaleur urbains 14

3.1 Sous-systèmes fonctionnels du chauffage urbain 14

3.2 Générations de réseaux de chaleur urbains en détail 14

3.2.1 Première génération : Distribution de vapeur (fin XIXe – début XXe siècle) 14

3.2.2 Deuxième génération : distribution d'eau chaude (1930–1970) 16

3.2.3 Troisième génération : Distribution de l'eau chaude (<100 °C) 17

3.2.4 Quatrième génération : RCU intelligent, à basse température (50–70 °C) avec intégration des énergies renouvelables 18

3.2.5 Cinquième génération : Communautés énergétiques à température ambiante 18

3.3 Sous-stations 19

3.3.1 Rôle et fonction 19

3.3.2 Technologies des échangeurs de chaleur 20

4 Énergie renouvelable dans le chauffage urbain 21

4.1 Énergie géothermique 21

4.2 Solaire thermique 22

4.3 Unités de valorisation énergétique des déchets (UVE) dans les RCU 22

4.3.1 L'usine Spittelau de Vienne 23

4.4 Récupération de la chaleur résiduelle dans le chauffage urbain 26

4.4.1 Chaleur résiduelle industrielle 26

4.4.2 Centres de données 26

4.4.3 Infrastructures municipales 27

5 Tendances futures : réseaux de 4e et 5e génération 28

5.1 Objectifs de la 4e génération 28

5.2 Vision de la 5e génération 28
6 Politiques et considérations économiques 29
7 Conclusion 29
8 Bibliographie 30

1 Introduction aux réseaux de chaleur urbains

Historiquement, les réseaux de chaleur urbains (RCU) ont évolué en réponse à des préoccupations économiques et de sécurité. Les premiers utilisateurs cherchaient à améliorer l'utilisation du combustible, à centraliser les émissions de combustion loin des zones peuplées et à réduire les risques liés au maintien de plusieurs chaudières à vapeur haute pression dans les bâtiments résidentiels.

De ses débuts à la fin du XIXe siècle – avec des pionniers comme Birdsill Holly aux États-Unis – aux réseaux modernes de 4e et 5e génération à basse température intégrés aux énergies renouvelables, les RCU ont connu une transformation substantielle.

1.1 Avantages et inconvénients des réseaux de chauffage urbain

Les réseaux de chaleur urbains offrent une série d'avantages qui en font une option attrayante pour fournir de l'énergie thermique aux utilisateurs résidentiels, commerciaux et industriels. L'un de ses principaux avantages réside dans l'efficacité économique. En centralisant la production de chaleur, les systèmes de chauffage urbain pourraient exploiter des économies d'échelle, réduisant le coût par unité de chaleur par rapport à plusieurs systèmes individuels plus petits. Cette approche centralisée tend également à réduire les coûts de service, car les activités d'exploitation et de maintenance sont consolidées, nécessitant moins de ressources et de personnel spécialisé que de nombreux systèmes décentralisés.

L'un des principaux avantages est que les RCU permettent d'exploiter les énergies renouvelables telles que la géothermie et les déchets thermiques comme l'incinérateur, ce qui n'aurait pas été possible par construction. L'UE vise un parc immobilier entièrement décarboné et zéro émission d'ici 2050, transformant le plus grand consommateur d'énergie d'Europe en un secteur climatiquement neutre. Le chauffage urbain contribue à atteindre cet objectif, car une part significative des bâtiments ne pourrait pas être chauffée par des énergies renouvelables sans un système centralisé d'alimentation en chaleur.

Un autre avantage important est l'amélioration de la qualité de l'air. En situant des installations de production de chaleur en dehors des zones urbaines densément peuplées, l'exposition directe des résidents aux produits de combustion est minimisée. Les centrales de production de chaleur sont également mieux adaptées à un contrôle précis des performances. Des systèmes d'automatisation avancés et des outils de prévision de charge peuvent être mis en œuvre pour adapter la production de chaleur de près à la demande, assurant ainsi un fonctionnement efficace tout au long de la saison de chauffage.

Malgré ces avantages, les réseaux de chaleur urbains ne sont pas sans inconvénients. L'un des défis les plus importants est les pertes liées au transport de la chaleur. Lorsque l'eau chaude ou la vapeur circule dans les canalisations de distribution, une partie de la chaleur est inévitablement perdue, en particulier dans les réseaux anciens ou lorsque la chaleur doit être transportée sur de longues distances. Les coûts initiaux élevés des infrastructures constituent un autre obstacle, car la construction du réseau nécessite des canalisations, des sous-stations et des systèmes de contrôle et donc un investissement en capital important. De plus, les réseaux de chauffage urbain peuvent être sujets à des vulnérabilités qui peuvent potentiellement affecter l'ensemble de la zone desservie ; une perturbation de la source centrale de chaleur – que ce soit en cas de défaillance d'équipement ou de problèmes d'alimentation en combustible.

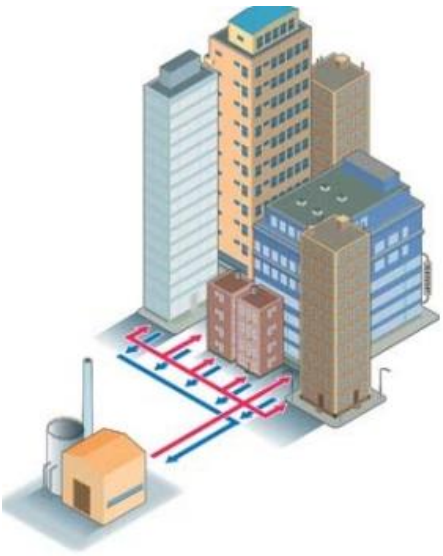


Figure 1. Figure illustrative d'un réseau de chauffage urbain (decentralizedenergy)

1.2 Production et sources de chaleur

Les systèmes de chauffage urbain peuvent être alimentés par une grande variété de sources de chaleur, chacune offrant des avantages techniques et environnementaux distincts. Les centrales de chauffage dédiées font partie des plus courantes, utilisant généralement des chaudières alimentées au gaz naturel, à la biomasse pour produire de l'eau chaude ou de la vapeur destinée à la distribution. Ces centrales sont simples dans leur conception et leur exploitation, ce qui les rend adaptées aussi bien aux réseaux petits qu'aux grands réseaux.

Une approche plus efficace se trouve dans les centrales de cogénération (CHP), qui produisent de l'électricité et captent la chaleur résiduelle de ce procédé pour le chauffage urbain. En utilisant une énergie thermique qui serait autrement jetée, les systèmes CHP peuvent atteindre une efficacité énergétique globale bien supérieure comparée à la production séparée de chaleur et d'électricité.

De plus en plus, les réseaux se tournent vers des sources d'énergie renouvelable telles que les champs solaires thermiques, la géothermie et les pompes à chaleur à grande échelle. Ces options peuvent réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre tout en diminuant la dépendance aux combustibles fossiles à long terme. Une autre source précieuse est la récupération de la chaleur résiduelle, qui capte la chaleur excédentaire des procédés industriels, des centres de données ou des usines d'incinération des déchets et la redirige vers le réseau de chaleur urbain.

Les systèmes modernes de chauffage urbain utilisent souvent l'intégration multi-sources, combinant plusieurs de ces technologies au sein d'un même réseau. Cette approche renforce non seulement la résilience du système – en garantissant que l'approvisionnement en chaleur puisse se poursuivre même si une source devient indisponible – mais soutient aussi les objectifs de développement durable en permettant une plus grande part de la chaleur renouvelable et récupérée dans le mix énergétique.

1.3 Réseaux de chaleur en Europe

Le degré d'adoption des réseaux de chaleur varie considérablement à travers le monde, refletant les différences de climat, de traditions d'urbanisme et de politique énergétique. En Europe du Nord et en Scandinavie, les réseaux de chaleur possèdent une tradition bien établie. Dans des pays comme le Danemark,

la Suède et la Finlande, plus de la moitié de la demande de chauffage est satisfaite par des réseaux de chaleur urbains. Cette prévalence est soutenue par des climats froids, des densités de population élevées dans les centres urbains et des investissements à long terme dans des infrastructures énergétiques centralisées.

En Europe occidentale, l'adoption du chauffage urbain s'est accélérée ces dernières décennies. Des pays comme l'Allemagne, la France et les Pays-Bas ont considérablement étendu leurs réseaux, principalement motivés par des politiques de décarbonation et un désir de réduire la dépendance aux combustibles fossiles. L'intégration des sources d'énergie renouvelable et de la récupération de la chaleur résiduelle dans les systèmes de chauffage urbain est devenue une stratégie centrale pour atteindre les objectifs climatiques nationaux.

En revanche, de nombreux pays d'Europe de l'Est ont hérité de systèmes de chauffage urbain de l'ère socialiste. Ces grands réseaux peuvent desservir des villes entières mais souffrent souvent d'inefficacités, de pertes thermiques importantes et d'infrastructures obsolètes. Les programmes de modernisation – allant de la modernisation des pipelines au remplacement des anciennes chaudières par des systèmes à base de renouvelables – sont désormais un point central pour les décideurs politiques et les services publics dans les pays de l'Est.

À travers l'Europe, des cadres politiques tels que la directive européenne sur l'efficacité énergétique (EED), ainsi que des objectifs nationaux de réduction du carbone, jouent un rôle central dans l'orientation de l'expansion et de la modernisation du chauffage urbain. Ces politiques encouragent à la fois une amélioration de l'efficacité du système et une transition vers des sources de chaleur faibles en carbone et renouvelables, façonnant l'avenir des réseaux de chaleur dans divers contextes régionaux.

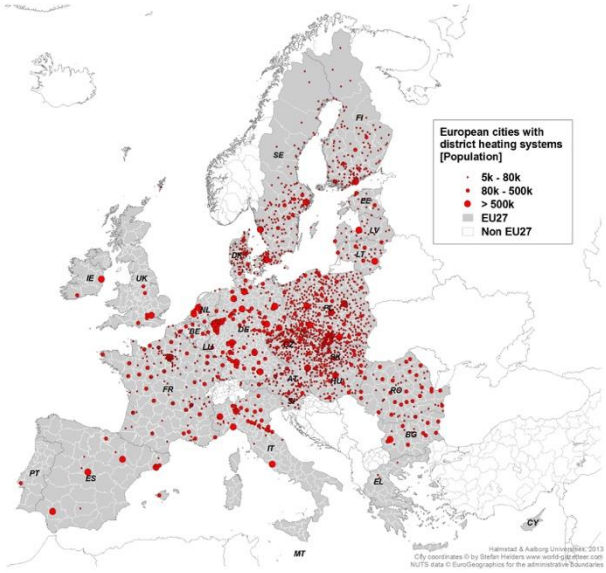


Figure 2. Carte de la pénétration des RCU en Europe (wwwsolarthermalworldorg)

2 Développement historique : générations de RCU

L'évolution de la technologie de réseaux de chaleur est souvent décrite en termes de « générations » distinctes, chacune représentant des avancées dans les méthodes de distribution de la chaleur, les régimes de température et l'intégration des systèmes. Bien que quatre générations soient largement reconnues, une cinquième émerge désormais dans le cadre de la transition énergétique.

2.1 Première génération : Distribution à vapeur

Les systèmes de chauffage urbain de première génération étaient basés sur la distribution de vapeur, un concept introduit à la fin du XIXe siècle aux États-Unis. Ces systèmes délivraient de la vapeur à haute température – souvent bien au-dessus de 100 °C – comme milieu de transfert de chaleur. Bien qu'efficaces pour fournir de grandes quantités de chaleur, ils souffraient de pertes de distribution importantes, de risques de sécurité dus aux hautes pressions et de corrosion des tuyaux métalliques. Bien qu'en grande partie remplacés par des alternatives modernes, certains réseaux à vapeur restent en service, comme celui desservant Manhattan à New York.

2.2 Deuxième génération : distribution d'eau chaude

La deuxième génération, dominante entre les années 1930 et 1970 – notamment en Union soviétique – s'est tournée vers de l'eau surchauffée sous des pressions où l'eau est inférieure à la température d'ébullition comme milieu de transfert. Ces systèmes fonctionnent généralement avec des températures d'alimentation comprises entre 120 °C et 200 °C, souvent au-dessus du point d'ébullition atmosphérique. Bien qu'ils aient réduit certains risques liés à la vapeur, ils souffrent encore d'un mauvais contrôle, d'exigences élevées en main-d'œuvre et de pertes substantielles de distribution de la chaleur .

2.3 Troisième génération : Distribution de l'eau chaude

Les réseaux de chaleur de troisième génération sont apparus dans les années 1970, marquant une amélioration significative en efficacité et en flexibilité. Ces systèmes fonctionnent avec de l'eau chaude à des températures d'alimentation inférieures à 100 °C et ont introduit des tuyaux pré-isolés pour réduire les pertes. Les sous-stations modulaires sont devenues la norme, simplifiant l'installation et la maintenance. Des températures plus basses ont également permis l'intégration de sources d'énergie renouvelable et la récupération de la chaleur résiduelle, rendant ces systèmes plus durables sur le plan environnemental.

2.4 Quatrième génération : Chauffage urbain intelligent à basse température

S'appuyant sur ces avancées, la quatrième génération se concentre sur la distribution à basse température – généralement entre 50 °C et 70 °C – et intègre des concepts de réseaux intelligents. Les sources d'énergie renouvelable, les pompes à chaleur à grande échelle et la récupération de la chaleur résiduelle jouent un rôle dominant. Ces systèmes conviennent particulièrement aux bâtiments modernes bien isolés avec une faible demande de chauffage, et leurs contrôles numériques permettent une gestion et une optimisation précises de la charge.

2.5 Cinquième génération : Communautés énergétiques à température ambiante

La cinquième génération émergente va plus loin en exploitant des réseaux à ultra-basse température ou même à température ambiante. Dans ces systèmes, chaque bâtiment est équipé d'une pompe à chaleur qui élève la température au niveau requis. La capacité de flux bidirectionnel permet des « communautés énergétiques », où les bâtiments peuvent agir à la fois comme consommateurs et producteurs – prosumeurs – partageant la chaleur entre voisins et faisant du réseau un véritable réseau thermique décentralisé.

3 Sous-systèmes et technologies de réseaux de chaleur urbains

3.1 Sous-systèmes fonctionnels du chauffage urbain

Division de la chaleur – L'allocation contrôlée des flux de chaleur entre différentes branches ou zones du réseau de chauffage urbain, garantissant que chaque zone reçoit la quantité d'énergie appropriée.

Transfert de chaleur – Le déplacement réel de l'énergie thermique à travers les canalisations de distribution isolées depuis la source centrale jusqu'aux emplacements des consommateurs.

Un réseau de chaleur urbain (RCU) comprend quatre sous-systèmes essentiels :

1. Production de chaleur – Production centralisée utilisant chaudières, centrales de cogénération, collecteurs renouvelables ou unités de récupération de la chaleur résiduelle.
2. Division de la chaleur – L'allocation et la régulation du flux de chaleur vers différentes branches du réseau.
3. Transfert de chaleur – Transport d'énergie thermique via des canalisations isolées vers les zones de consommation.
4. Consommation de chaleur – L'utilisation de la chaleur dans les bâtiments pour le chauffage des pièces, l'eau chaude sanitaire (ECS) ou les procédés industriels.

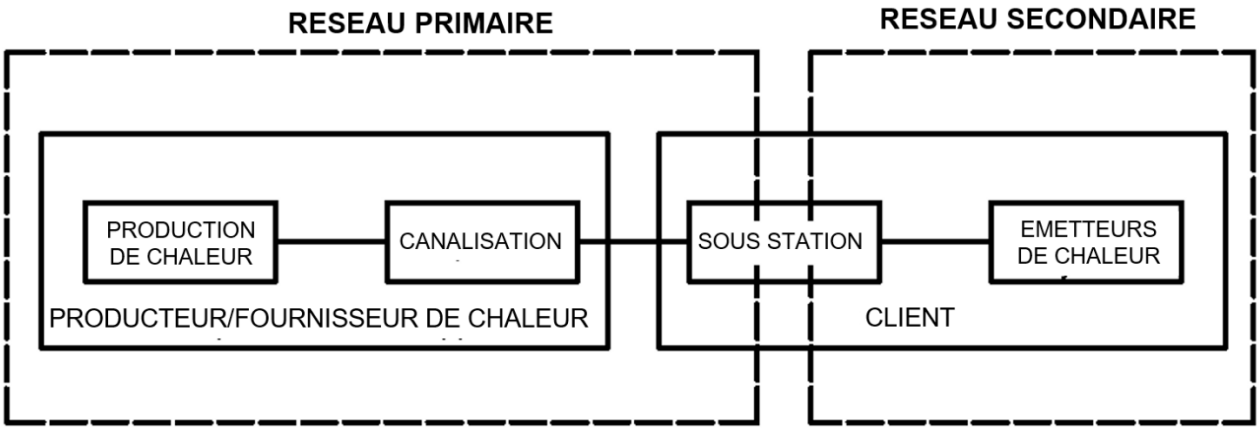


Figure 3. Sous-systèmes fonctionnels de RCU [14]

3.2 Générations de réseaux de chaleur urbains en détail

3.2.1 Première génération : Distribution de vapeur (fin XIXe – début XXe siècle)

Le prototype pionnier de Birdsill Holly a été construit durant l'hiver 1878–1879 à Lockport, New York, fournissant de la vapeur aux bâtiments voisins. Bien que l'élimination du besoin de chaudières individuelles réduise les risques d'explosion, les premiers systèmes étaient confrontés à des fuites liées à la corrosion, à de lourdes pertes de distribution et étaient sujets à des explosions dangereuses de pipelines causant des blessures et des décès.

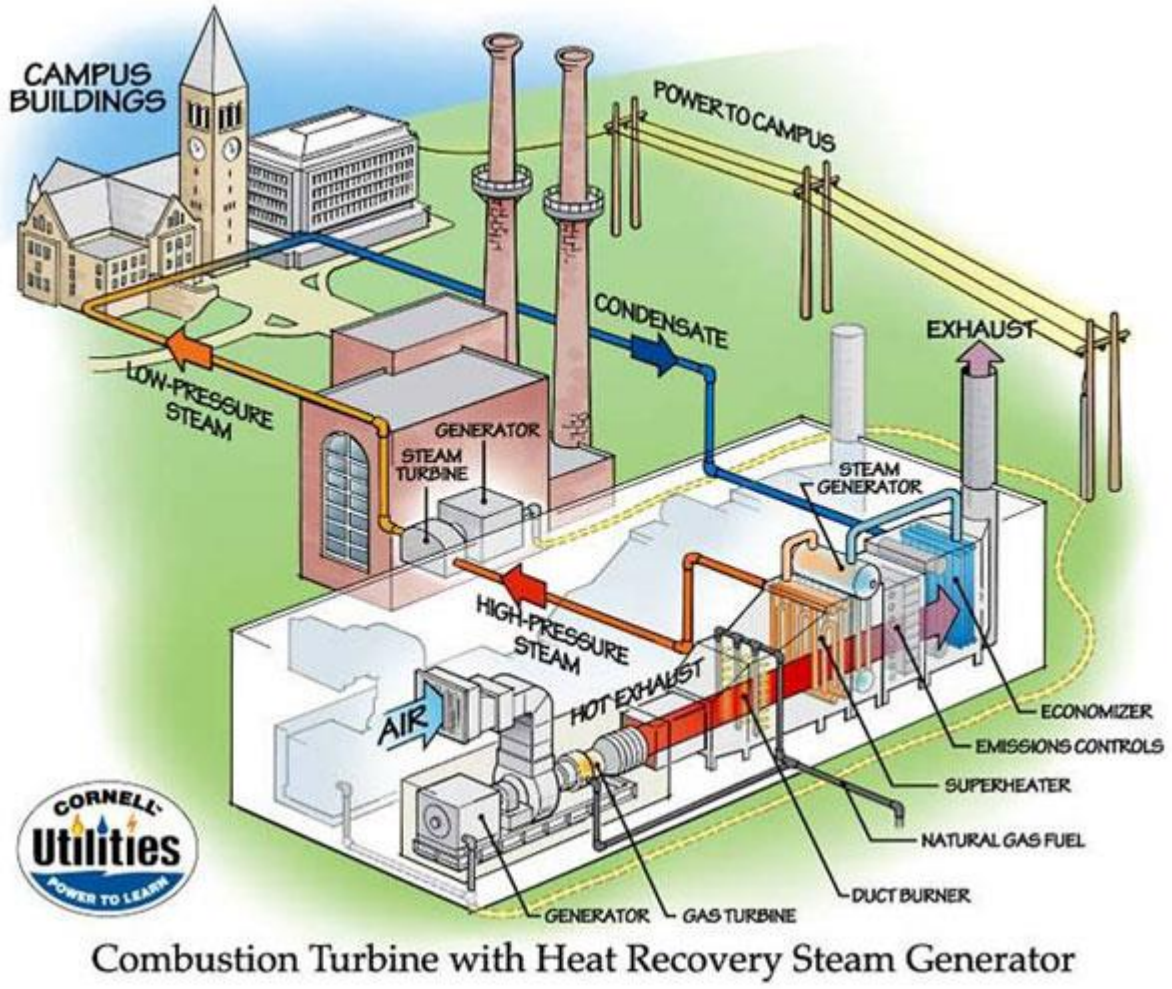


Figure 4. Figure illustrative de la distribution de la vapeur (httpsfzbellowscom)

La première forme de chauffage urbain, connue sous le nom de systèmes de première génération, reposait sur le transport direct de vapeur d'une centrale vers les utilisateurs finaux via des pipelines à haute pression. Birdsill Holly a développé l'un des premiers prototypes opérationnels en 1878–1879 à Lockport, New York. À l'époque, la distribution de vapeur offrait des avantages évidents : elle éliminait le besoin de nombreuses chaudières à petite échelle dans les bâtiments individuels, réduisant ainsi le risque d'explosions dans les zones urbaines densément peuplées. Cependant, la technologie présentait également des inconvénients importants. De fortes pertes thermiques étaient dues à une température de distribution très élevée et à l'efficacité limitée des matériaux isolants disponibles à l'époque. La corrosion et les fuites étaient des défis de maintenance persistants, tandis que les risques pour la sécurité – y compris le risque d'explosions dans les pipelines – restaient préoccupants. Avec l'avancement de la technologie, les systèmes à vapeur sont devenus considérés comme obsolètes, la plupart ayant été déclassés. Néanmoins, certains continuent d'opérer dans des cas de niche, comme certaines parties de Manhattan, ainsi que dans certaines villes européennes comme Hambourg et Copenhague, où les systèmes historiques ont été reconstruits ou préservés.



Figure 5. Réseau de chaleur historique à vapeur à Manhattan (Lizio-Katzen, dátum nélk.)

3.2.2 Deuxième génération : distribution d'eau chaude (1930–1970)

En Hongrie et dans d'autres régions, les pipelines de surface distinctifs avec de grands virages en U étaient courants. Ces boucles structurelles absorbaient la dilatation thermique des longues conduites en acier, évitant ainsi les dommages mécaniques.

La deuxième génération de chauffage urbain marqua un passage de la vapeur à la distribution d'eau chaude pressurisée, avec des températures d'alimentation dépassant généralement 100 °C. Ces systèmes apparurent dans les années 1930 et restèrent dominants jusqu'en 1970 environ. L'eau chaude était acheminée par des conduites en acier, souvent installés dans des conduits en béton, offrant une certaine protection contre l'environnement. Cette approche devint particulièrement répandue en Union soviétique et en Europe de l'Est, où des systèmes de chauffage urbain à grande échelle furent construits pour desservir des villes entières. Bien qu'efficaces pour fournir de fortes charges thermiques, ces systèmes présentaient des limites notables. L'installation était très laborieuse du fait de la construction de conduits et soudures sur site. La flexibilité opérationnelle était limitée, rendant difficile l'intégration de sources renouvelables ou basse température. Les pertes de chaleur étaient également plus élevées par rapport aux générations ultérieures, notamment dans les conduits mal isolés. Dans certaines régions, comme la Hongrie, des systèmes de canalisations en surface avec des virages en U distinctifs étaient utilisés pour compenser l'expansion thermique, caractéristique visuelle des réseaux de chauffage urbain du milieu du XXe siècle.



Figure 6. Conduites de RCU en surface (mokshahu)



Figure 7. Les conduites souterraines de RCU avec des virages en U compensant la dilatation thermique [15]

3.2.3 Troisième génération : Distribution de l'eau chaude (<100 °C)

À partir des années 1970, la troisième génération a introduit des améliorations technologiques significatives visant à accroître l'efficacité et à réduire les pertes. Les températures d'alimentation sont descendues sous 100 °C, permettant l'utilisation de tuyaux en acier pré-isolés pouvant être enterrés directement dans le sol sans nécessiter de coûteux conduits en béton. Cette innovation a réduit les coûts d'installation, minimisé les pertes de chaleur et permis un déploiement plus rapide du réseau. Un autre jalon fut l'introduction de postes de base préfabriqués et modulaires, qui remplacèrent les grands échangeurs de chaleur à faisceaux tubulaires des conceptions antérieures par des échangeurs à plaques compactes. Ces sous-stations nécessitaient moins d'espace, offraient de meilleures performances thermiques et réduisaient la main-d'œuvre sur site grâce à l'assemblage en usine. Des températures d'alimentation plus basses facilitèrent également l'intégration de sources d'énergie renouvelable telles que les collecteurs solaires thermiques et

la géothermique. En Europe de l'Est, de nombreux anciens systèmes de l'époque soviétique ont depuis été modernisés avec une technologie de troisième génération pour améliorer l'efficacité et la fiabilité.



Figure 8. Sous-station modulaire préfabriquée (à gauche), tuyauterie pré-isolée (à droite) (fotavhu)(magyarepitok)

3.2.4 Quatrième génération : RCU intelligent, à basse température (50–70 °C) avec intégration des énergies renouvelables

La quatrième génération s'appuie sur les gains d'efficacité de sa prédécesseure tout en alignant le chauffage urbain avec les exigences des bâtiments économes énergétiquement et d'un système énergétique décarboné. Fonctionnant à des températures d'alimentation comprises entre 50 °C et 70 °C, ces systèmes réalisent des pertes de distribution significativement réduites et sont optimisés pour l'intégration avec des systèmes de contrôle intelligents. En utilisant des prévisions météorologiques et des données de consommation en temps réel, les opérateurs peuvent ajuster dynamiquement la production de chaleur pour répondre à la demande, améliorant à la fois confort et efficacité. Les réseaux de quatrième génération sont parfois intégrés à des réseaux électriques intelligents, permettant da faire la gestion flexible d'électricité et de chaleur. Le régime de température réduit ouvre des possibilités de récupération de chaleur résiduelle à partir de sources non conventionnelles, notamment les systèmes de refroidissement des centres de données, la ventilation des stations de métro, et la chaleur des eaux usées extraites via des pompes à chaleur. Un exemple marquant est la ville intelligente d'Aspern à Vienne, où la chaleur renouvelable, la cogénération et le stockage thermique sont combinées dans un cadre de contrôle entièrement automatisé.

3.2.5 Cinquième génération : Communautés énergétiques à température ambiante

La cinquième génération, actuellement en adoption précoce, représente un changement de paradigme dans la conception du chauffage urbain. Ces réseaux fonctionnent à ou près de la température ambiante du sol (environ 10–25 °C), utilisant des pompes à chaleur décentralisées dans des bâtiments individuels pour augmenter la température du chauffage des espaces ou pour assurer le refroidissement en été. Cette configuration permet des flux de chaleur bidirectionnels, permettant aux bâtiments de fonctionner à la fois comme consommateurs et producteurs – dits prosumeurs – qui peuvent injecter un excès de chaleur dans le réseau pour que d'autres puissent l'utiliser. La température de fonctionnement ultra-basse élimine

pratiquement les pertes de distribution et rend le système très compatible avec les stratégies saisonnières de stockage thermique et de couplage sectoriel, reliant les systèmes de chauffage, de refroidissement et électriques en une communauté énergétique unifiée. Un exemple est le réseau Paris-Saclay en France, où le partage décentralisé de l'énergie et l'intégration des renouvelables forment l'épine dorsale de l'infrastructure locale de chauffage et de climatisation.

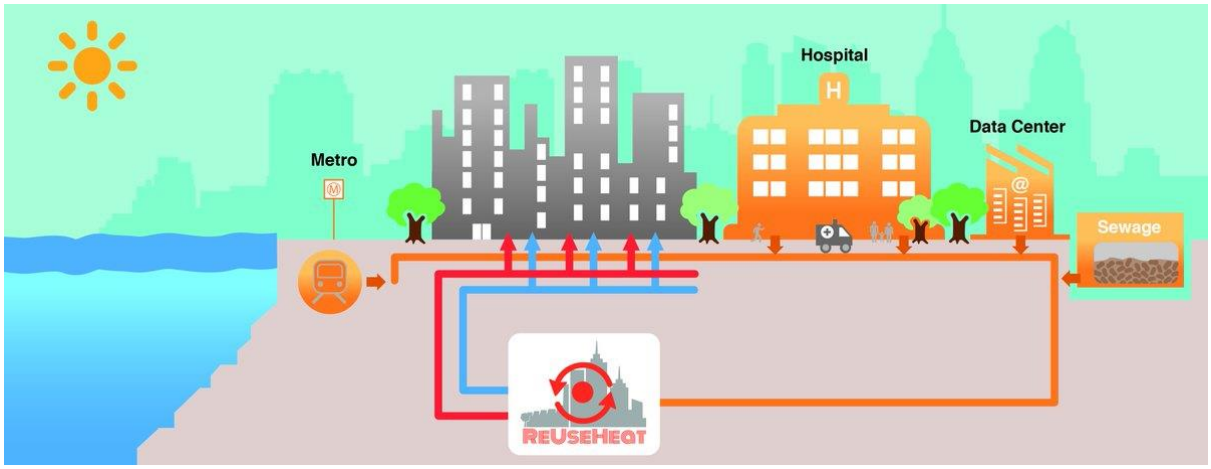
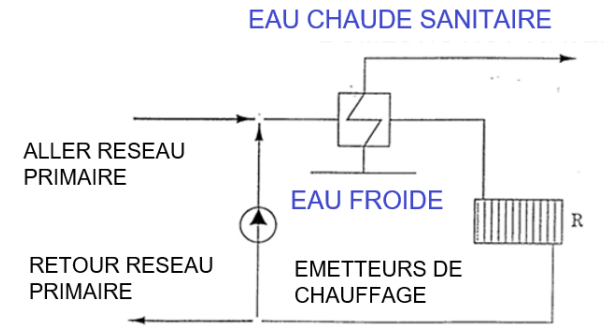


Figure 9. Diagramme conceptuel de la communauté énergétique de 5e génération (reuseheateu)

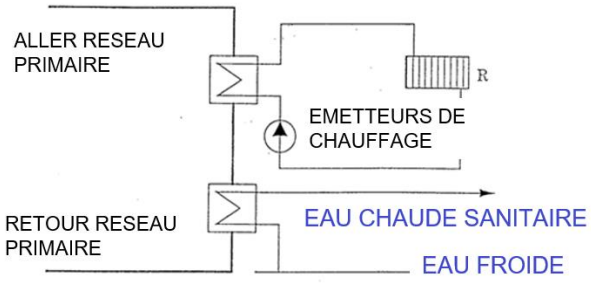
3.3 Sous-stations

3.3.1 Rôle et fonction

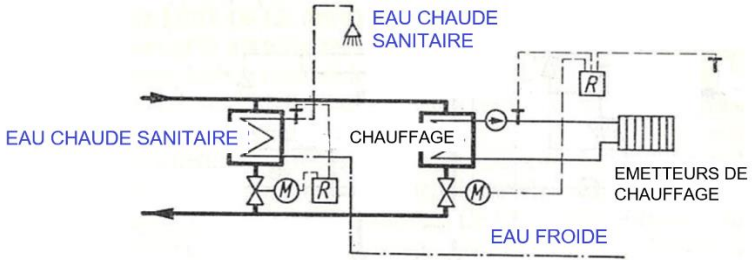
La sous-station de chauffage urbain est l'interface entre le réseau principal de chauffage urbain (RCU) et le système de chauffage interne du bâtiment. Sa fonction principale est de transférer l'énergie thermique du réseau de distribution vers le bâtiment tout en contrôlant la température d'alimentation, les débits et les pressions du système. Deux configurations principales de sous-stations sont utilisées en pratique. Dans une sous-station directe, le circuit de chauffage du bâtiment est connecté hydrauliquement au réseau primaire, permettant à l'eau chaude du réseau de chaleur de circuler directement à travers les radiateurs ou boucles de chauffage du bâtiment. Cette configuration est simple mais place le système sous les mêmes conditions de pression opérationnelle et de qualité de l'eau que le RCU. En revanche, une sous-station indirecte utilise des échangeurs de chaleur pour séparer hydrauliquement le circuit du bâtiment du réseau primaire. Cette configuration améliore la sécurité opérationnelle, réduit le risque de contamination de l'eau côté réseau et offre une plus grande flexibilité dans la conception du système. Une autre variante est la sous-station indirecte avec contrôle de débit variable, qui ajuste le débit primaire en réponse à la demande du bâtiment, améliorant ainsi l'efficacité énergétique.



(a)



(b)



(c)

Figure 10. Types de connexion hydraulique entre le réseau primaire de chauffage urbain et les bâtiments. Direct (a), Indirect (b) Indirect avec débit variable (c) (Kiss, 1997)

3.3.2 Technologies des échangeurs de chaleur

Historiquement, les échangeurs de chaleur à faisceaux tubulaires étaient la technologie standard utilisée dans les sous stations. Bien que robustes, ces unités sont encombrantes, lourdes et nécessitent un espace d'installation important. Elles ont également tendance à avoir une efficacité de transfert thermique inférieure aux technologies plus récentes. Au fil du temps, les échangeurs à plaques sont devenus le choix privilégié dans la plupart des nouvelles installations. Ces unités compactes consistent en plusieurs plaques fines et ondulées disposées pour créer des canaux alternés pour les fluides primaires et secondaires. Leur grande surface et leur géométrie améliorant la turbulence offrent une grande efficacité thermique dans un espace réduit. Les échangeurs de chaleur à plaques sont également plus faciles à nettoyer, entretenir et agrandir, ce qui les rend bien adaptés aux conceptions modulaires de postes adaptables aux besoins de charge changeants.

4 Énergie renouvelable dans le chauffage urbain

4.1 Énergie géothermique

L'énergie géothermique représente l'une des sources de chaleur les plus constantes et durables pour les systèmes de chauffage urbain. Son principe consiste à extraire de l'énergie thermique à partir de réservoirs souterrains, qui peut être transférée directement au réseau de chauffage urbain ou améliorée à des températures plus élevées grâce à l'utilisation de pompes à chaleur. En Islande, la chaleur géothermique a été exploitée à grande échelle, comme dans sa capitale Reykjavik, où elle couvre environ 90 % de sa demande thermique via le RCU. Au-delà du chauffage des bâtiments, les tuyaux de retour du système sont également utilisés pour des applications secondaires telles que la fonte de la neige et des glaces sur les routes. En Islande, l'excédent d'eau géothermique basse température provenant des conduites de retour des RCU est en effet réutilisé pour le chauffage des trottoirs et des routes, faisant fondre la neige et la glace afin d'améliorer la sécurité hivernale.

Les principaux avantages du chauffage urbain géothermique incluent des coûts d'exploitation faibles et des émissions minimales de CO_2 une fois l'infrastructure en place. Cependant, sa faisabilité dépend fortement de conditions géologiques spécifiques, limitant l'application généralisée aux régions disposant de ressources géothermiques accessibles.



Figure 11. Centrale géothermique et systèmes de chauffage urbain en Islande (nesjavellir)



Figure 12. Après avoir circulé dans le bâtiment, la chaleur géothermique excédentaire et de faible qualité est utilisée pour le dégivrage des routes (underfloor)

4.2 Solaire thermique

Les centrales solaires thermiques de grande envergure peuvent également être intégrées aux réseaux de chaleur urbains, offrant une source de chaleur renouvelable et zéro émission, en particulier dans les régions à forte irradiance solaire. Les collecteurs solaires – qu'ils soient à plaques ou à tubes sous vide – captent l'énergie solaire, qui est ensuite transférée au réseau de chauffage urbain ou stockée dans de grands réservoirs d'eau chaude pour une utilisation ultérieure. Le stockage de chaleur saisonnier est souvent utilisé pour équilibrer le décalage entre la disponibilité solaire maximale en été et la demande de chauffage maximale en hiver. Un exemple notable est la centrale solaire de chauffage urbain Marstal au Danemark, qui combine de vastes champs de collecteurs solaires avec un stockage saisonnier de chaleur souterrain pour répondre à une part importante des besoins en chauffage de la ville. Cependant, les systèmes solaires thermiques rencontrent le défi d'adapter l'offre à la demande hivernale, ce qui nécessite souvent une hybridation avec d'autres sources de chaleur telles que les chaudières à biomasse ou des cogénérations.

4.3 Unités de valorisation énergétique des déchets (UVE) dans les RCU

Les unités de valorisation énergétique des déchets (UVE) ou unités d'incinération des ordures ménagères (UIOM) sont des technologies de conversion d'énergie qui récupèrent de la chaleur et de l'électricité à partir de déchets solides municipaux qui seraient autrement éliminés en décharge. Dans une UVE typique, les déchets sont brûlés dans des conditions contrôlées, libérant de l'énergie thermique utilisée pour produire de la vapeur. Cette vapeur peut entraîner des turbines pour la production d'électricité tout en fournissant simultanément de l'énergie thermique aux réseaux de chauffage urbain via des procédés combinés de chauffage et d'électricité (CHP). En plus de la production d'énergie, les centrales modernes de type UVE contribuent à une gestion durable des déchets en réduisant le volume des déchets résiduels, en récupérant

les matériaux recyclables des résidus de combustion et en diminuant les impacts environnementaux liés à la décharge. Dans le cadre d'un système énergétique intégré, les technologies de conversion des déchets en énergie contribuent à la gestion efficace des ressources, renforcent la sécurité énergétique et fournissent une source de chaleur locale fiable pouvant compléter les technologies d'énergie renouvelable dans les réseaux de chauffage urbain.

4.3.1 L'usine Spittelau de Vienne

La refonte architecturale de l'usine a été réalisée par l'artiste et architecte autrichien Friedensreich Hundertwasser, en faisant un monument emblématique de Vienne.

- Conçu par l'architecte Friedensreich Hundertwasser après une rénovation dans les années 1990.
- Performance :
  - Chauffage pour 60 000 foyers.
  - Électricité pour 50 000 foyers.
  - Traite 250 000 tonnes de déchets par an.
  - Produit 120 000 MWh d'électricité et 500 000 MWh de chaleur.
- Importance : Combine la gestion des déchets urbains avec la cogénération à haute efficacité.



Figure 13. Usine Spittelau WtE, Vienne (wwwwienenergieat)

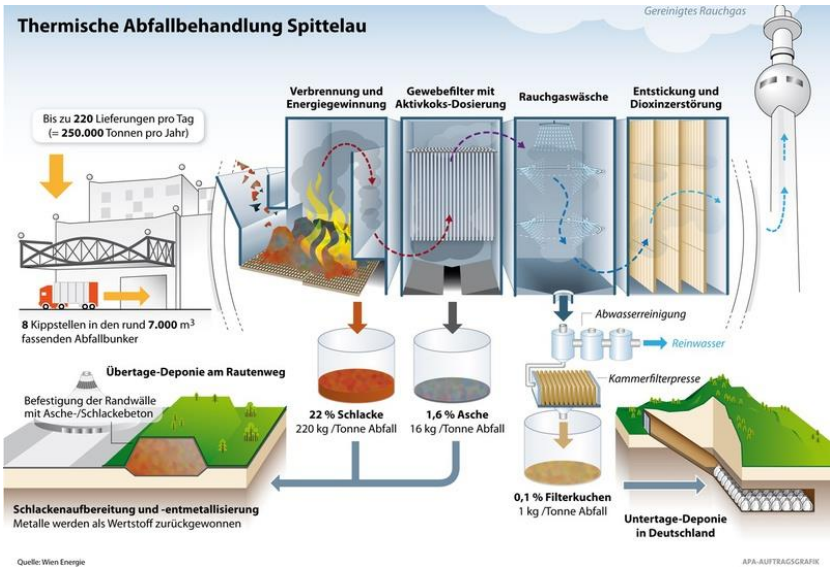


Figure 14. Projet de fonctionnement de l'usine de traitement thermique des déchets à Vienne (wwwwienenergieat)

La Figure 15 montre la tendance à long terme illustrant l'expansion significative et la transformation structurelle de l'approvisionnement en chauffage urbain de Vienne entre 1979 et 2006. Bien que la production totale de chaleur ait augmenté de manière spectaculaire au cours de ces trois décennies, la composition des sources d'énergie s'est orientée vers une plus grande efficacité et durabilité. Les centrales thermiques classiques à combustible fossile (jaune), qui jouaient autrefois un rôle plus important, ont été réduites à seulement 4,1 %, tandis que la production simultanée de chauffage et d'électricité (cogénération) (rouge) est devenue la technologie dominante, fournissant 61,3 % de la chaleur totale. De plus, la part de la récupération des déchets (noir) a augmenté régulièrement pour constituer près d'un quart (24,8 %) de l'offre totale, soulignant la tendance stratégique de la ville vers les principes de l'économie circulaire et la récupération énergétique.

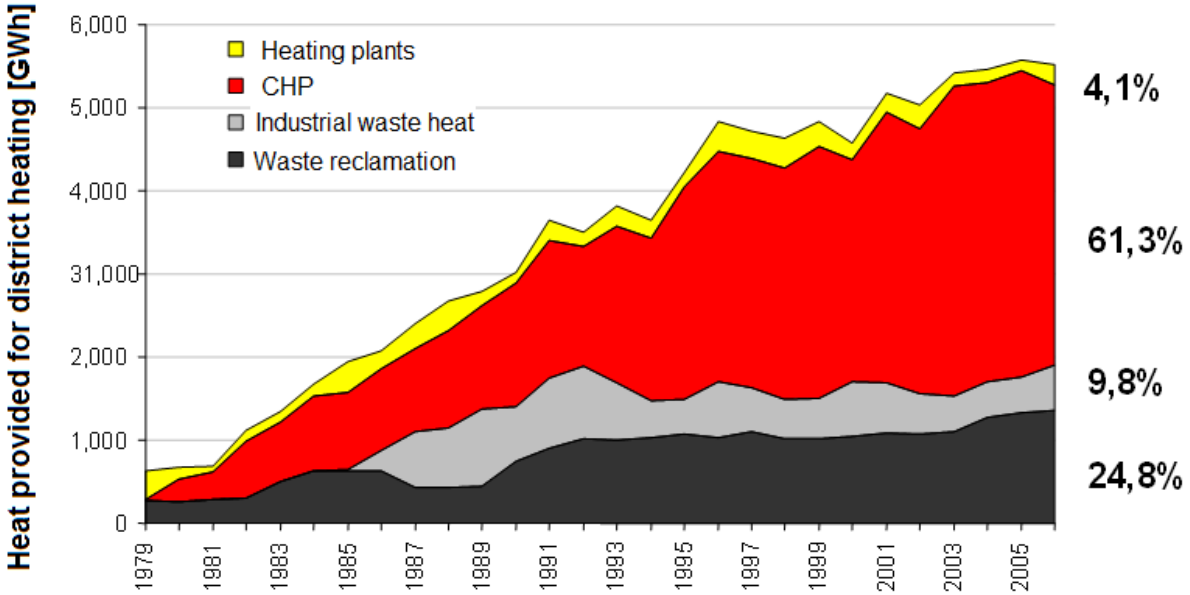


Figure 15. Évolution des sources de chaleur prévues pour le chauffage urbain à Vienne [14]

La figure 16 illustre le profil de charge thermique quotidienne du système de chauffage urbain de Vienne tout au long de 2006, montrant comment différentes sources d'énergie sont déployées en fonction de la demande saisonnière. La charge de base grise reste relativement constante toute l'année, alimentée principalement par l'incinération des déchets et la chaleur industrielle résiduelle, garantissant que la demande d'eau chaude estivale est couverte par les sources les moins chères. La zone rouge représente la charge moyenne, couverte par les centrales de cogénération ; cette couche s'adapte considérablement aux besoins accrus en chauffage durant les mois froids. Enfin, les pics de charge en jaune n'apparaissent que pendant les jours les plus froids de l'hiver, utilisant des centrales thermiques comme solution de pointe flexible pour combler l'écart lorsque la demande dépasse la capacité des producteurs de base et moyenne charge.

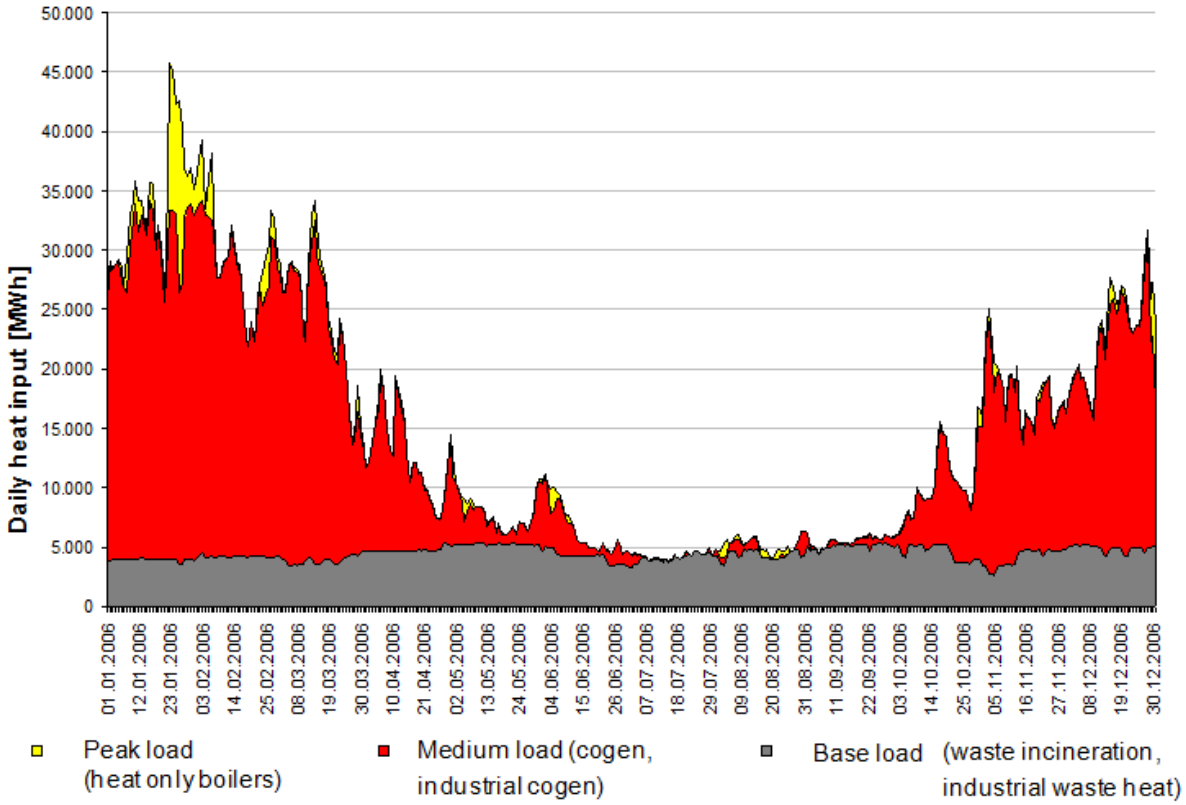


Figure 16. Evolution du mix de production au cours de l'année [14]

4.4 Récupération de la chaleur résiduelle dans le chauffage urbain

La récupération de l'énergie thermique excédentaire provenant des procédés existants représente une stratégie très efficace pour réduire l'impact environnemental du chauffage urbain. En utilisant la chaleur qui serait autrement rejetée dans l'environnement, la récupération de la chaleur perdue contribue à la réduction des émissions, améliore l'efficacité du système et diminue la dépendance aux sources de combustible fossiles. Dans les réseaux de chauffage urbain de quatrième génération, les températures d'alimentation relativement basses rendent techniquement et économiquement possible l'intégration de plusieurs formes de chaleur résiduelle de faible qualité.

4.4.1 Chaleur résiduelle industrielle

Les grandes installations industrielles – telles que les aciéries, les raffineries de pétrole et les usines chimiques – sont des sources majeures de chaleur résiduelle récupérable. Cette chaleur, souvent sous forme d'eau ou de gaz d'échappement à basse à moyenne température, peut être transférée dans le réseau de chauffage urbain sans consommation supplémentaire de combustible, réduisant ainsi les émissions globales du système. Un exemple notable est l'usine de cuivre Aurubis à Hambourg, en Allemagne, où la chaleur excédentaire provenant de la production de cuivre est captée et injectée dans le système local de chauffage urbain. Cette intégration entraîne une réduction annuelle d'environ 20 000 tonnes d'émissions de CO_2 tout en remplaçant la production de chaleur à base de combustibles fossiles.

4.4.2 Centres de données

En 2010, la consommation mondiale d'électricité des centres de données a atteint environ 350 TWh, dépassant 1 % de la consommation mondiale totale. Dans l'UE, la consommation est passée de 56 TWh/an

en 2007 à environ 104 TWh/an d'ici 2020, les systèmes de refroidissement représentant environ 40 % de la consommation totale d'énergie. Les centres de données de taille moyenne (capacité informatique de 1 MW) peuvent émettre environ 3 700 MWh/an de chaleur récupérable, ce qui équivaut à environ 0,46 MWh de chaleur résiduelle pour 1 MWh consommé.

Les centres de données sont une autre source en forte croissance de chaleur résiduelle récupérable, en raison de leur consommation d'électricité élevée et constante. En 2020, les centres de données de l'Union européenne ont consommé environ 104 TWh d'électricité, dont une grande partie est finalement libérée sous forme de chaleur via les systèmes de refroidissement. La chaleur résiduelle, généralement à des températures comprises entre 30 °C et 50 °C, peut être captée à l'aide d'échangeurs de chaleur et réhaussée via des pompes à chaleur pour le chauffage urbain. L'initiative Stockholm Data Parks illustre cette approche, offrant des services de refroidissement gratuits aux centres de données en échange de la livraison de leur chaleur résiduelle au réseau de chauffage urbain de la ville.



Figure 17. Salle des serveurs adaptée à l'utilisation de la chaleur résiduelle (reuseheateu)

4.4.3 Infrastructures municipales

Dans toute l'UE, les métros pourraient théoriquement fournir entre 6,7 et 11,2 TWh/an de chaleur résiduelle. Dans le monde entier, les réseaux de trains souterrains couvrent 11 000 km et desservent 151 millions de passagers par jour, créant d'importantes opportunités de récupération thermique à faible intensité.

Les systèmes de transport urbain peuvent également servir de sources non conventionnelles mais précieuses de chaleur de basse qualité. Les métros, par exemple, libèrent d'importantes quantités de chaleur via les systèmes de freinage des trains, les équipements électriques et l'occupation des passagers. Dans toute l'UE, le potentiel théorique de récupération des systèmes d'aération des métros est estimé entre 6,7 et 11,2 TWh par an. À Paris, des projets expérimentaux récupèrent la chaleur résiduelle des stations de métro et la transfèrent vers des bâtiments résidentiels et commerciaux voisins. De même, les réseaux d'égouts représentent une source stable d'énergie thermique, avec des températures des eaux usées variant généralement entre 10 °C et 20 °C. À Cologne, en Allemagne, les systèmes de récupération de chaleur des eaux usées fournissent environ 5 % de la demande locale en chauffage urbain, démontrant la viabilité d'intégrer la chaleur résiduelle des infrastructures municipales dans les systèmes modernes de RCU.

Rien qu'en Allemagne, la chaleur des eaux usées pourrait théoriquement répondre à 20 % de la demande de chauffage du parc immobilier, avec des températures moyennes des eaux usées atteignant 10 à 15°C toute l'année et atteignant jusqu'à 20°C en été.

5 Tendances futures : réseaux de 4e et 5e génération

5.1 Objectifs de la 4e génération

Les réseaux de chaleur urbains de quatrième génération sont conçus pour répondre à la fois aux objectifs d'efficacité énergétique et climatiques. Un objectif technique principal est de maintenir de basses températures de distribution – généralement entre 50 °C et 70 °C – réduisant ainsi les pertes de chaleur, améliorant l'efficacité du système et permettant l'intégration de sources renouvelables et récupérées de faible qualité. Augmenter la part renouvelable de l'approvisionnement en chaleur est une ambition centrale, réalisée par l'intégration d'énergie solaire thermique, de sources géothermiques et de pompes à chaleur à grande échelle alimentées par l'électricité renouvelable. Les systèmes de contrôle intelligents jouent un rôle crucial, avec des algorithmes avancés et des prévisions basées sur l'IA permettant d'optimiser l'approvisionnement en temps réel en fonction des prévisions météorologiques et des modes de consommation. De plus, le couplage sectoriel – l'intégration des réseaux de chaleur urbains avec l'électricité et les réseaux de froid– offre de nouvelles opportunités pour équilibrer les flux d'énergie, stocker l'électricité renouvelable excédentaire sous forme de chaleur et renforcer la résilience globale du système.

5.2 Vision de la 5e génération

La cinquième génération de chauffage urbain représente une vision transformatrice pour les systèmes énergétiques urbains. Ces réseaux fonctionnent à des températures ambiantes – souvent entre 10 °C et 25 °C – et utilisent un flux bidirectionnel pour permettre l'échange de chaleur entre bâtiments. Chaque bâtiment connecté est équipé d'une pompe à chaleur localisée pouvant augmenter la température pour le chauffage des bâtiments ou fournir un refroidissement lors des mois plus chauds, offrant une grande flexibilité. Une caractéristique déterminante des réseaux de cinquième génération est la création de communautés énergétiques décentralisées, où chaque participant peut fonctionner à la fois comme consommateur et producteur (prosumer). Ce modèle encourage le partage local de l'énergie et soutient une meilleure intégration des énergies renouvelables à faible température. De plus, les conceptions de cinquième génération intègrent généralement des solutions intégrées de stockage saisonnier – telles que le stockage thermique en forage, les aquifères ou les grandes surfaces de chaleur – pour capter l'énergie excédentaire lors des périodes de faible demande pour les saisons de chauffage de pointe. Ensemble, ces caractéristiques créent un modèle de chauffage très adaptable et bas carbone capable de soutenir les villes durables futures.



Figure 18. Figure schématique de la communauté énergétique (ParisSaclay)

6 Politiques et considérations économiques

Étude de cas – Le premier RCU de Budapest : Le tout premier système municipal de chauffage urbain à Budapest a servi de preuve de concept pour l'approvisionnement centralisé en chaleur urbaine. Aujourd'hui, la question de l'approvisionnement énergétique principal d'une municipalité consiste à équilibrer le rôle du vaste réseau gazier naturel hongrois avec l'intégration des sources de chaleur résiduelle industrielles, créant des bénéfices mutuels pour l'industrie et les consommateurs urbains.

- Directive européenne sur l'efficacité énergétique : Encourage des RCU efficaces dans le cadre de la stratégie de décarbonation.
- Tarification du carbone : Augmente la compétitivité des RCU en utilisant des sources à faible émission de carbone.
- Financement : Les partenariats public-privé, les obligations vertes et les fonds de cohésion de l'UE sont des éléments clés pour la modernisation des infrastructures.

7 Conclusion

Le chauffage urbain est un composant éprouvé, adaptable et de plus en plus vital des systèmes énergétiques urbains durables. Des réseaux à vapeur pionniers du XIXe siècle aux réseaux intelligents de 5e génération alimentés par les énergies renouvelables, la technologie a évolué pour répondre aux besoins environnementaux, économiques et sociaux changeants.

L'avenir verra les RCU agir non seulement comme un service de chauffage, mais comme une infrastructure thermique urbaine intégrée, permettant résilience, flexibilité et neutralité climatique.

8 Bibliographie

[1] Alfa Laval : Chauffage urbain / Chauffage communautaire, https://www.alfalaval.com.co/globalassets/documents/microsites/heating-and-cooling-hub/application-sheets-heating/district-heating_community-heating-for-gaskted-plate-heat-exchangers.pdf

[2] Urban Persson : Heat Roadmap Europe 2050.https ://www.4dh.eu/resources/Urban%20Persson_Heat%20Roadmap%20EUR%202050_Nov%2020133d06.pdf ?docid=205

[3] Institut d'études environnementales et énergétiques (EESI) : Le rôle de l'énergie de district/Chauffage et Énergie combinées dans les solutions de politique énergétique et climatique, https://www.eesi.org/briefings/view/the-role-of-district-energy-combined-heat-and-power-in-energy-and-climate-p

[4] https://www.fanpage.it/esteri/paura-a-new-york-esplosione-in-strada-colonna-di-fumo-altissima-edifici-evacuati/

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

[6] http://www.fotav.hu.

[7] [En ligne]. Disponible : http://www.magyarepitok.hu.

[8] [En ligne]. Disponible : reuseheat.eu.

[9] R. Kiss, Távhőhuoltoi zsebkönyv, Budapest : Tekniska Könyvkiadó, 1997.

[10] [En ligne]. Disponible : https://en.wikipedia.org/wiki/File:NesjavellirPowerPlant_edit2.jpg .

[11] [En ligne]. Disponible : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%22Under-floor_heating%22_in_the_street.jpg.

[12] [En ligne]. Disponible : https://www.wienenergie.at.

[13] https://www.chooseparisregion.org/news/combine-environmental-excellence-rd-design-sustainable-city.

[14] Dr Zoltán Szánthó : Transport de chaleur - diapositives de cours. Université de technologie et d'économie de Budapest.

[15] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fernw%C3%A4rme_u_bogen.jpg