SHaKE
Sharing Knowledge on Energy Communities

Co-funded by the European Union

Formation professionnelle intensive Réseaux de chaleur et de froid

Partie du programme pédagogique SHaKE sur les réseaux de chaleur et de froid

Guide de formation

Ressource pour une formation professionnelle de six heures

Version : 1.0
Date : août 2026

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

Projet

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

Auteurs et contributeurs

Le présent guide de formation est compilé à partir des six guides pédagogiques SHaKE approuvés. Les auteurs et les établissements contributeurs sont indiqués au début de chaque module.

Édition

Eva Szalma

Mention du financement européen et clause de non-responsabilité

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

Coordinateur

Université de technologie et d'économie de Budapest, Hongrie

Établissements partenaires

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

Remerciements

Cette publication a été élaborée dans le cadre du projet SHaKE. Le consortium remercie l'ensemble des enseignants, chercheurs, professionnels et parties prenantes ayant contribué à l'élaboration, à l'évaluation et à l'amélioration des supports pédagogiques.

Licence

Sauf indication contraire, ce matériel est mis à disposition selon les termes de la licence internationale Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0). Il peut être partagé et adapté, à condition de créditer le projet SHaKE et ses auteurs, de fournir un lien vers la licence et de signaler toute modification.

Référence bibliographique recommandée :

Consortium SHaKE. Formation professionnelle intensive sur les réseaux de chaleur et de froid : guide de formation. Projet SHaKE, 2026.

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

Guide d'utilisation de la formation professionnelle intensive SHaKE

La formation professionnelle intensive SHaKE est un programme de six heures destiné aux professionnels souhaitant acquérir une vue d'ensemble ciblée des technologies actuelles des réseaux de chaleur et de froid (RDC), de leur exploitation et de leur rénovation. Elle fait partie du programme pédagogique SHaKE et s'appuie directement sur les six modules O1 en anglais.

La formation professionnelle ne reprend ni ne résume tous les thèmes du programme O1 complet. Pour chaque module, le partenaire responsable a sélectionné les diapositives jugées les plus pertinentes pour la pratique professionnelle. Les parties théoriques de ce guide ont été alignées sur cette sélection. Dans la mesure du possible, la formulation des guides pédagogiques O1 approuvés a été conservée afin d'assurer la cohérence avec les ressources SHaKE évaluées.

Les six présentations synthétiques constituent les principaux supports pédagogiques pour la mise en œuvre de la formation. Le présent guide fournit les bases théoriques et les questions d'autoévaluation correspondantes. Les participants ayant besoin d'explications plus détaillées, d'autres thèmes, d'exercices ou d'études de cas peuvent consulter les ressources O1 complètes sur le site du projet SHaKE.

Publics cibles

La formation s'adresse principalement aux professionnels et aux participants à la formation professionnelle continue travaillant dans les réseaux énergétiques et domaines connexes, notamment :

- les exploitants de réseaux de chaleur et de froid, ingénieurs et personnels techniques ;
- les ingénieurs en génie climatique et en systèmes énergétiques ;
- les consultants et concepteurs en énergie ;
- les responsables municipaux et territoriaux de la planification énergétique ;
- les professionnels de l'efficacité énergétique, de la décarbonation et de la rénovation des bâtiments ou des réseaux ;
- les formateurs et enseignants dispensant des formations courtes sur les systèmes énergétiques urbains.

Des connaissances préalables de base en systèmes énergétiques, installations techniques des bâtiments ou réseaux de chaleur et de froid sont recommandées. Cette formation constitue une vue d'ensemble professionnelle, et non un cours d'initiation à l'ingénierie.

Résultats d'apprentissage

À l'issue de la formation intensive, les participants devraient être capables de :

- expliquer le rôle des réseaux modernes de chaleur et de froid dans la transition énergétique et les communautés énergétiques ;
- interpréter les concepts essentiels relatifs aux besoins des bâtiments, aux sous-stations et aux réseaux primaires dans la pratique professionnelle des RDC ;
- comparer les principales options de production de chaleur et expliquer le rôle de la chaleur fatale, des pompes à chaleur et de l'intégration des énergies renouvelables ;
- décrire les principales technologies des réseaux de froid et le rôle de la production combinée de chaleur et de froid ainsi que du stockage d'énergie thermique ;
- reconnaître les dysfonctionnements courants et distinguer les approches de détection des anomalies et de détection des défauts ;

- identifier les priorités techniques lors de la rénovation des anciens réseaux de chaleur et de la transition vers des températures plus basses ;
- relier les concepts techniques de la formation aux décisions pratiques de planification, d'exploitation et de rénovation des RDC.

Programme indicatif de formation de six heures

La formation peut être dispensée sur six heures consécutives selon la progression recommandée ci-dessous. Les formateurs peuvent adapter les thèmes et la répartition du temps au profil professionnel des participants, tout en conservant les six modules comme cadre commun.

Horaires	Thème	Module SHaKE	Orientation professionnelle
0:00–0:45	Introduction aux RDC modernes et aux communautés énergétiques	Module 1	Rôle des RDC dans la transition énergétique
0:45–1:30	Besoins en chaleur et en froid, sous-stations et régulation	Module 2	Compréhension des besoins côté consommateurs
1:30–2:30	Production de chaleur, chaleur fatale, pompes à chaleur, énergies renouvelables	Module 3	Choix technologiques et intégration
2:30–3:15	Réseaux de froid et systèmes combinés chaleur/froid	Module 4	Technologies du froid et couplage sectoriel
3:15–4:15	Systèmes avancés, optimisation et outils numériques	Module 5	Exploitation, régulation, numérisation, diagnostic des défauts
4:15–5:15	Rénovation des réseaux de chaleur existants	Module 6	Réseaux anciens, gestion de la demande
5:15–6:00	Discussion, études de cas, autoévaluation	Tous les modules	Application à la pratique professionnelle

Utilisation recommandée par les formateurs

Les présentations et le guide de formation sont conçus pour être utilisés ensemble. La progression pratique proposée est la suivante :

Présenter le module à l'aide de la présentation synthétique. Utiliser les diapositives comme principal support visuel et privilégier les sujets professionnels sélectionnés par le partenaire responsable.

Utiliser le guide de formation comme support théorique. Le document peut être distribué pour une lecture préalable, comme dossier remis aux participants ou comme référence pendant la séance. Il suit le contenu des présentations synthétiques plutôt que l'intégralité du module O1.

Relier les contenus à la pratique professionnelle. Utiliser les exemples, les implications opérationnelles et les études de cas présents dans les ressources sélectionnées pour inviter les participants à comparer ces notions à leurs propres systèmes et expériences.

Vérifier la compréhension. Les questions d'autoévaluation à la fin de chaque module peuvent être utilisées immédiatement après le module, comme brève évaluation formative ou lors de la discussion finale.

Conclure par une discussion transversale. Les 45 dernières minutes sont consacrées aux échanges, à des études de cas choisies, à l'autoévaluation et à l'application professionnelle des concepts étudiés.

Parcours recommandé aux participants

- Consulter la présentation synthétique de chaque module et la partie correspondante du guide pour consolider les connaissances techniques.
- Répondre aux questions d'autoévaluation de chaque module afin d'identifier les notions à approfondir.
- Profiter de la discussion finale pour relier les six thèmes et envisager l'application des technologies et approches dans son propre contexte professionnel.
- Consulter les modules SHaKE complets destinés à l'enseignement supérieur (https://www.shakeproject-dhc.eu/learning-materials/) pour approfondir les sujets et accéder aux ressources pédagogiques, exercices, études de cas et références.

Évaluation et autoévaluation

Chaque module se termine par cinq questions courtes d'autoévaluation et un corrigé. Elles servent avant tout à vérifier les acquis dans une démarche formative et ne constituent pas un examen distinct. Les formateurs peuvent les utiliser à la fin de chaque module ou sélectionner des questions parmi les six modules pour la discussion et la révision des 45 dernières minutes.

Lorsque cela est utile, le corrigé peut être suivi d'une brève discussion expliquant pourquoi la réponse correcte convient et comment le problème se présente dans les véritables RDC. L'évaluation reste ainsi liée au jugement professionnel et à la pratique.

Adaptation de la formation

Le programme indicatif constitue une structure commune de six heures, mais les formateurs peuvent adapter les exemples, le temps de discussion et la place accordée aux différents thèmes aux besoins des participants. Les présentations professionnelles synthétiques définissent le périmètre essentiel d'O2. Des contenus supplémentaires provenant des modules O1 complets peuvent être utilisés en complément si le temps le permet.

Supports de formation disponibles

Le programme O2 de formation professionnelle intensive comprend :

- le présent guide intégré, qui rassemble les extraits théoriques destinés aux professionnels et les questions d'autoévaluation avec corrigés ;
- six présentations professionnelles synthétiques, une par module SHaKE ;
- le programme pédagogique SHaKE O1 complet, accessible en ligne pour approfondissement et référence.

Les présentations professionnelles et les sections correspondantes du guide doivent être utilisées conjointement : les présentations définissent le périmètre de la formation intensive, tandis que le guide fournit les bases théoriques approuvées qui les accompagnent.

Table des matières

Guide d'utilisation de la formation professionnelle intensive SHaKE 4

Module 1 : Introduction aux réseaux de chaleur 9

1.1 Introduction aux réseaux de chaleur 9
1.2 Avantages des réseaux de chaleur et options d'approvisionnement 9
1.3 Réseaux de chaleur en Europe 10
1.4 Évolution historique : les générations de réseaux de chaleur 10
1.4.1 Première génération : distribution de vapeur 10
1.4.2 Deuxième génération : distribution d'eau chaude 10
1.4.3 Troisième génération : distribution d'eau chaude à température modérée 11
1.4.4 Quatrième génération : réseaux de chaleur intelligents à basse température 11
1.5 Énergies renouvelables dans les réseaux de chaleur 11
1.5.1 Énergie géothermique 11
1.5.2 Valorisation énergétique des déchets dans les réseaux de chaleur : Spittelau, Vienne 11
1.6 Valorisation de la chaleur fatale et communautés énergétiques de cinquième génération 12
1.7 Conclusion 12
1.8 Questions d'autoévaluation 12

Module 2 : Besoins en chaleur et en froid des bâtiments 14

2.1 Sous-stations et importance d'une faible température de retour 14
2.2 Configurations des sous-stations 14
2.2.1 Configuration à un échangeur de chaleur 14
2.2.2 Configuration parallèle 14
2.2.3 Configuration en série 15
2.2.4 Configuration à deux étages 15
2.2.5 Comparaison des configurations de sous-stations 15
2.3 Architectures des réseaux primaires 15
2.3.1 Réseau à deux tubes 15
2.3.2 Réseau à trois tubes 16
2.3.3 Réseau à trois tubes en cascade 16
2.3.4 Réseau à quatre tubes 16
2.4 Questions d'autoévaluation 16

Module 3 : Production de chaleur 18

3.1 Récupération et classification de la chaleur fatale 18
3.2 Revalorisation de la chaleur fatale 19
3.2.1 Réutilisation 19
3.2.2 Technologies actives 19
3.3 Pompes à chaleur à compression de vapeur 20
3.3.1 Principaux composants 20
3.4 Configurations et raccordements des sources de chaleur fatale 21
3.4.1 Raccordement direct au circuit primaire 21
3.4.2 Échangeur intermédiaire (système indirect) 21
3.4.3 Circuit fermé avec fluides caloporteurs secondaires 22
3.4.4 Systèmes de stockage (réservoirs thermiques) 22
3.4.5 Intégration aux flux d'air ou de gaz 22
3.5 Questions d'autoévaluation 22

Module 4 : Réseaux de froid 24

4.1 Groupes frigorifiques 24

4.1.1 Fonctionnement et types de groupes frigorifiques 24
4.1.2 Principaux indicateurs et efficacité 24
4.2 Machines frigorifiques à absorption 25
4.2.1 Principaux composants 25
4.2.2 Paramètres pertinents 25
4.2.3 Comparaison avec les systèmes à compression de vapeur 25
4.3 Stockage d'énergie thermique (SET) 26
4.3.1 Principal avantage du stockage dans les réseaux de froid 26
4.3.2 Types de stockage thermique 26
4.4 Questions d'autoévaluation 27
Module 5 : Systèmes avancés des réseaux de chaleur et de froid 29
5.1 Importance de la détection des dysfonctionnements 29
5.1.1 Panorama des défauts dans les RDC 29
5.1.2 Données disponibles et difficultés de diagnostic 29
5.2 Détection des anomalies et des défauts 30
5.2.1 Fonctionnement normal et détection des anomalies 30
5.2.2 Classification et détection des défauts par apprentissage automatique 31
5.3 Exemple de détection de défaut : encrassement d'un échangeur de chaleur 31
5.3.1 Perspective opérationnelle 31
5.4 Questions d'autoévaluation 32
Module 6 : Rénovation des réseaux de chaleur 33
6.1 Rôle des réseaux de chaleur et nécessité de leur rénovation 33
6.1.1 Contexte historique et systèmes anciens 33
6.2 Rénovation côté bâtiment 33
6.2.1 Rénovation des systèmes monotubes 34
6.2.2 Sous-stations compactes et modulaires 34
6.3 Transition vers les réseaux de chaleur à basse température 34
6.3.1 Adaptations des bâtiments et enjeu de l'ECS 35
6.4 Mesure et facturation de la consommation de chaleur 35
6.5 Rénovation des réseaux de chaleur urbains : études de cas 35
6.5.1 Réseau Bunhill de chaleur et d'électricité, Londres 35
6.5.2 Projet Citigen, Londres 36
6.5.3 Développement des réseaux de chaleur et de froid de Paris 36
6.6 Questions d'autoévaluation 37

Module 1 : Introduction aux réseaux de chaleur

Orientation professionnelle : rôle des RDC dans la transition énergétique

Auteurs et contributeurs : Balázs Bokor, Zoltán Takács | Université de technologie et d'économie de Budapest

1.1 Introduction aux réseaux de chaleur

Historiquement, les réseaux de chaleur se sont développés pour répondre à des préoccupations économiques et de sécurité. Les premiers utilisateurs cherchaient à mieux valoriser les combustibles, à éloigner les émissions liées à la combustion des zones habitées et à réduire les risques associés à la multiplication des chaudières à vapeur à haute pression dans les immeubles résidentiels.

Depuis leurs origines à la fin du XIXe siècle, notamment grâce à des pionniers comme Birdsill Holly aux États-Unis, jusqu'aux réseaux de quatrième et cinquième générations à basse température intégrant les énergies renouvelables, les réseaux de chaleur ont connu une profonde transformation.

1.2 Avantages des réseaux de chaleur et options d'approvisionnement

Les réseaux de chaleur présentent plusieurs avantages pour alimenter en énergie thermique les bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels. L'un des principaux est leur efficacité économique. La centralisation de la production permet de réaliser des économies d'échelle et de réduire le coût unitaire de la chaleur par rapport à de nombreuses installations individuelles. Elle réduit aussi généralement les coûts de service, car l'exploitation et la maintenance sont regroupées et nécessitent moins de ressources et de personnel spécialisé que de multiples installations décentralisées.

Un avantage majeur des réseaux de chaleur est de permettre l'exploitation d'énergies renouvelables, comme la géothermie, et de sources de chaleur fatale, notamment les installations d'incinération, difficilement mobilisables à l'échelle d'un bâtiment isolé. L'Union européenne vise un parc immobilier entièrement décarboné et sans émissions d'ici à 2050. Les réseaux de chaleur contribuent à cet objectif, car une part importante des consommateurs ne pourrait bénéficier des énergies renouvelables sans approvisionnement centralisé.

L'amélioration de la qualité de l'air constitue un autre avantage important. L'implantation des installations de production à l'écart des zones urbaines densément peuplées réduit l'exposition directe des habitants aux produits de combustion. Les centrales permettent également une régulation plus précise des performances. Des dispositifs d'automatisation et de prévision des charges peuvent adapter la production à la demande et assurer un fonctionnement efficace pendant toute la saison de chauffage.

Les réseaux de chaleur peuvent utiliser diverses sources, chacune présentant des avantages techniques et environnementaux particuliers. Les chaufferies dédiées sont parmi les plus courantes : leurs chaudières utilisent généralement du gaz naturel, de la biomasse ou du fioul pour produire de l'eau chaude ou de la vapeur distribuée dans le réseau. Leur conception et leur exploitation sont relativement simples et conviennent aux petits comme aux grands réseaux.

La cogénération constitue une approche plus efficace : elle produit de l'électricité et récupère la chaleur issue de cette production pour alimenter un réseau de chaleur. En valorisant une énergie thermique autrement dissipée, les installations de cogénération peuvent atteindre un rendement énergétique global nettement supérieur à la production séparée de chaleur et d'électricité.

Les réseaux se tournent de plus en plus vers des sources renouvelables, notamment les installations solaires thermiques, les puits géothermiques et les grandes pompes à chaleur. Ces solutions peuvent

réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre ainsi que la dépendance durable aux combustibles. La récupération de chaleur fatale est également précieuse : elle capte la chaleur excédentaire des procédés industriels, des centres de données ou des incinérateurs et l'achemine vers le réseau.

Les réseaux de chaleur modernes intègrent fréquemment plusieurs sources au sein d'une même infrastructure. Cette intégration multisource renforce la résilience du système en maintenant l'approvisionnement si une source devient indisponible. Elle soutient aussi les objectifs de durabilité en augmentant la part de chaleur renouvelable et récupérée dans le mix énergétique.

1.3 Réseaux de chaleur en Europe

Le développement des réseaux de chaleur varie fortement selon les régions du monde, en fonction du climat, des traditions d'aménagement urbain et des politiques énergétiques. En Europe du Nord et en Scandinavie, ces réseaux bénéficient d'une longue tradition. Au Danemark, en Suède et en Finlande, ils couvrent souvent plus de la moitié des besoins de chauffage urbains, grâce aux climats froids, aux fortes densités de population et aux investissements de long terme dans les infrastructures énergétiques centralisées.

En Europe occidentale, le déploiement des réseaux de chaleur s'est accéléré au cours des dernières décennies. L'Allemagne, la France et les Pays-Bas ont sensiblement développé leurs réseaux, principalement sous l'effet des politiques de décarbonation et de réduction de la dépendance aux combustibles fossiles. L'intégration des énergies renouvelables et de la chaleur fatale constitue désormais une stratégie centrale pour atteindre les objectifs climatiques nationaux.

À l'inverse, de nombreux pays d'Europe orientale ont hérité de vastes réseaux de chaleur de l'époque socialiste. Ces installations peuvent alimenter des villes entières, mais souffrent souvent de faibles rendements, de pertes thermiques et d'infrastructures vieillissantes. La modernisation, depuis l'amélioration de l'isolation des canalisations jusqu'au remplacement des anciennes chaudières par des systèmes renouvelables, est devenue une priorité des collectivités et des exploitants.

Dans toute l'Europe, des cadres réglementaires tels que la directive européenne relative à l'efficacité énergétique (DEE), ainsi que les objectifs nationaux de réduction des émissions de carbone, orientent le développement et la modernisation des réseaux. Ils favorisent l'amélioration des performances et la transition vers des sources de chaleur renouvelables et à faible émission de carbone.

1.4 Évolution historique : les générations de réseaux de chaleur

L'évolution des réseaux de chaleur est souvent décrite en « générations » distinctes, correspondant à des progrès dans les modes de distribution, les niveaux de température et l'intégration des systèmes. Quatre générations sont largement reconnues ; une cinquième apparaît actuellement dans le contexte de la transition énergétique.

1.4.1 Première génération : distribution de vapeur

Les réseaux de première génération reposaient sur la distribution de vapeur, introduite aux États-Unis à la fin du XIXe siècle. La vapeur, utilisée comme fluide caloporteur, circulait à haute température, souvent nettement supérieure à 100 °C. Ces réseaux transportaient d'importantes quantités de chaleur, mais subissaient de fortes pertes de distribution, présentaient des risques liés à la pression élevée et favorisaient la corrosion des canalisations métalliques. Bien qu'ils aient été largement remplacés, certains réseaux à vapeur demeurent en service, notamment à Manhattan, à New York.

1.4.2 Deuxième génération : distribution d'eau chaude

La deuxième génération, dominante entre les années 1930 et 1970, en particulier en Union soviétique, a adopté comme fluide caloporteur l'eau surchauffée maintenue sous pression pour éviter son ébullition. Ces réseaux fonctionnaient généralement avec des températures de départ comprises entre 120 °C et 200 °C, souvent au-dessus de la température d'ébullition à pression atmosphérique. Ils réduisaient certains risques associés à la vapeur, mais restaient difficiles à réguler, exigeaient beaucoup de main-d'œuvre à l'installation et connaissaient des pertes thermiques importantes.

1.4.3 Troisième génération : distribution d'eau chaude à température modérée

La troisième génération est apparue dans les années 1970, apportant des progrès importants en efficacité et en souplesse. Ces réseaux fonctionnent avec des températures de départ inférieures à 100 °C et utilisent des canalisations pré-isolées pour réduire les pertes. Les sous-stations modulaires se sont généralisées, simplifiant l'installation et la maintenance. Les températures plus basses facilitent également l'intégration des énergies renouvelables et de la récupération de chaleur fatale.

1.4.4 Quatrième génération : réseaux de chaleur intelligents à basse température

La quatrième génération privilégie une distribution à basse température, généralement entre 50 °C et 70 °C, et intègre des concepts de réseaux intelligents. Les énergies renouvelables, les pompes à chaleur de grande puissance et la récupération de chaleur fatale y jouent un rôle dominant. Ces réseaux sont particulièrement adaptés aux bâtiments modernes bien isolés à faibles besoins thermiques ; leur régulation numérique permet une gestion et une optimisation précises des charges.

1.5 Énergies renouvelables dans les réseaux de chaleur

1.5.1 Énergie géothermique

La géothermie est l'une des sources de chaleur les plus régulières et les plus durables pour les réseaux de chaleur. Son principe consiste à extraire l'énergie thermique des réservoirs souterrains, puis à la transférer directement au réseau ou à augmenter sa température à l'aide de pompes à chaleur. En Islande, la géothermie est exploitée à grande échelle : à Reykjavik, elle couvre environ 90 % des besoins de chauffage grâce au réseau de chaleur géothermique. Au-delà du chauffage des bâtiments, les canalisations de retour peuvent alimenter des usages secondaires, notamment la fonte de la neige et du verglas sur les routes et les trottoirs. Une fois l'infrastructure installée, la géothermie présente de faibles coûts d'exploitation et des émissions de CO_2 limitées. Sa faisabilité dépend toutefois des conditions géologiques locales, ce qui restreint son usage aux régions disposant de ressources accessibles.

En Islande, l'eau géothermique excédentaire à basse température provenant du retour du réseau sert également à chauffer les chaussées et les trottoirs pour faire fondre la neige et la glace et améliorer la sécurité hivernale.

1.5.2 Valorisation énergétique des déchets dans les réseaux de chaleur : Spittelau, Vienne

La valorisation énergétique des déchets permet de récupérer de la chaleur utile et de l'électricité à partir des déchets solides municipaux qui, autrement, seraient mis en décharge. Dans une installation typique, les déchets sont brûlés dans des conditions contrôlées, produisant une énergie thermique utilisée pour générer de la vapeur. Celle-ci peut entraîner des turbines électriques tout en fournissant de la chaleur aux réseaux urbains grâce à la cogénération. Outre la production d'énergie, les installations modernes contribuent à la gestion durable des déchets en réduisant leur volume résiduel, en récupérant les matières recyclables des résidus de combustion et en limitant les impacts de leur mise en décharge. Intégrées au système énergétique, ces technologies favorisent l'efficacité des

ressources, renforcent la sécurité d'approvisionnement et apportent une source locale fiable de chaleur complémentaire aux énergies renouvelables.

La transformation architecturale emblématique de l'usine a été réalisée par l'artiste et architecte autrichien Friedensreich Hundertwasser, faisant de cette installation un monument caractéristique de Vienne.

- Réaménagée dans les années 1990 selon les plans de Friedensreich Hundertwasser.
- Fournit de la chaleur à 60 000 logements.
- Fournit de l'électricité à 50 000 logements.
- Traite 250 000 tonnes de déchets par an.
- Produit 120 000 MWh d'électricité et 500 000 MWh de chaleur.
- Intérêt : associe la gestion des déchets urbains à une cogénération à haut rendement.

1.6 Valorisation de la chaleur fatale et communautés énergétiques de cinquième génération

La récupération de l'énergie thermique excédentaire issue des procédés existants constitue une stratégie efficace pour renforcer la durabilité des réseaux de chaleur. La valorisation d'une chaleur qui serait autrement rejetée dans l'environnement réduit les émissions et la consommation de combustibles primaires tout en améliorant l'efficacité du système. Dans les réseaux de quatrième génération, les températures de départ relativement basses rendent possible, sur les plans technique et économique, l'intégration de diverses sources de chaleur fatale à faible température.

La cinquième génération, encore au début de son déploiement, constitue un changement de paradigme dans la conception des réseaux. Ceux-ci fonctionnent à une température proche de celle du sol ambiant, environ 10 à 25 °C, avec des pompes à chaleur décentralisées dans les bâtiments pour atteindre la température requise pour le chauffage ou assurer le refroidissement en été. Cette configuration autorise des flux thermiques bidirectionnels : les bâtiments deviennent à la fois consommateurs et producteurs, ou « prosommateurs », en injectant de la chaleur excédentaire dans le réseau pour d'autres utilisateurs. Les températures de fonctionnement extrêmement basses réduisent pratiquement à néant les pertes de distribution et favorisent le stockage thermique saisonnier et le couplage sectoriel, reliant chaleur, froid et électricité au sein d'une communauté énergétique intégrée. Le réseau de Paris-Saclay, en France, illustre ce partage décentralisé d'énergie et l'intégration des renouvelables.

1.7 Conclusion

Les réseaux de chaleur constituent une composante éprouvée, adaptable et de plus en plus essentielle des systèmes énergétiques urbains durables. Depuis les premiers réseaux à vapeur du XIXe siècle jusqu'aux réseaux intelligents de cinquième génération alimentés par les énergies renouvelables, la technologie a évolué pour répondre aux enjeux environnementaux, économiques et sociaux.

À l'avenir, les réseaux de chaleur ne seront plus seulement un service de chauffage, mais une infrastructure thermique urbaine intégrée permettant résilience, flexibilité et neutralité climatique.

1.8 Questions d'autoévaluation

Choisissez la meilleure réponse. Le corrigé figure ci-dessous.

1. Quelle était l'une des principales raisons du développement des réseaux de chaleur à vapeur de première génération ?

- A. Favoriser l'installation de chaudières électriques individuelles dans chaque bâtiment
- B. Réduire les accidents de chaudières dans les immeubles résidentiels

- C. Supprimer la nécessité des canalisations de distribution
- D. Faire fonctionner les réseaux à température ambiante

2. Quelle caractéristique est associée aux réseaux de chaleur de troisième génération ?

- A. Distribution de vapeur à très haute pression
- B. Eau chaude à plus de 120 °C circulant dans des caniveaux en béton
- C. Températures de départ inférieures à 100 °C, canalisations pré-isolées et sous-stations modulaires
- D. Réseaux bidirectionnels fonctionnant uniquement à température ambiante

3. Quelle plage de température de départ est typique des réseaux de chaleur de quatrième génération ?

- A. 10–25 °C
- B. 50–70 °C
- C. 120–200 °C
- D. Plus de 200 °C

4. Quelle affirmation décrit le mieux l'énergie géothermique dans les réseaux de chaleur ?

- A. Elle est indépendante des conditions géologiques locales
- B. Elle exige toujours une combustion à la source de chaleur
- C. Elle peut fournir une chaleur à faibles coûts d'exploitation et à faibles émissions de CO_2, mais sa faisabilité dépend de la géologie
- D. Elle ne peut servir qu'à produire de l'électricité

5. Quelle caractéristique définit les communautés énergétiques de cinquième génération ?

- A. Distribution unidirectionnelle depuis une seule centrale à haute température
- B. Flux thermiques bidirectionnels permettant aux bâtiments d'être consommateurs et producteurs
- C. Utilisation exclusive de vapeur comme fluide caloporteur
- D. Suppression des pompes à chaleur dans les bâtiments raccordés

Corrigé

1	2	3	4	5
B	C	B	C	B

Note sur les sources : le texte théorique provient du guide pédagogique SHaKE approuvé du module 1 et suit les thèmes de la présentation O2 sélectionnée. Les références complètes figurent dans le guide original.

Module 2 : Besoins en chaleur et en froid des bâtiments

Orientation professionnelle : compréhension des besoins côté consommateurs

Auteurs et contributeurs : Dr Antoine Fabre, Dr Pascal Stabat | Mines Paris – PSL

2.1 Sous-stations et importance d'une faible température de retour

Dans une sous-station, les échangeurs de chaleur sont les éléments essentiels. Ils assurent la séparation hydraulique des réseaux primaire et secondaire ainsi que le transfert de la puissance requise. Une sous-station peut comporter un ou plusieurs échangeurs pour alimenter le chauffage des locaux, l'eau chaude sanitaire (ECS) ou améliorer les performances de l'ensemble des systèmes. L'efficacité des échangeurs est le principal facteur pour réduire la température de retour primaire et améliorer ainsi les performances du réseau de chaleur. Les échangeurs à plaques en contre-courant sont généralement utilisés, car ils sont plus compacts et plus efficaces que les autres types.

En fonctionnement, la puissance et la température de départ secondaire demandées ne sont pas constantes : elles varient généralement avec la température extérieure. Si le débit massique primaire reste constant alors que la puissance requise diminue, la température de retour primaire augmente, à température de départ primaire identique. Cet effet doit être évité pour préserver la performance globale du réseau. Le débit massique primaire doit donc être régulé selon les besoins du circuit secondaire. Cela s'effectue au moyen d'une vanne de régulation placée sur le circuit primaire de l'échangeur, commandée par un régulateur à partir d'une loi de température de départ et d'un capteur mesurant la température de départ secondaire.

Selon l'écart entre la température de départ secondaire mesurée et sa consigne, le régulateur commande l'ouverture ou la fermeture de la vanne.

2.2 Configurations des sous-stations

Après le dimensionnement de tous les composants, l'architecture globale de la sous-station doit être définie. Une sous-station fournit généralement au moins le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire et comporte donc souvent deux échangeurs de chaleur. Plusieurs architectures hydrauliques sont largement utilisées.

2.2.1 Configuration à un échangeur de chaleur

Cette configuration comprend deux échangeurs, mais un seul à l'interface entre les circuits primaire et secondaire.

Cette configuration est peu utilisée et moins efficace que celles décrites ci-après. Malgré sa simplicité, elle nécessite une température d'alimentation toujours égale ou supérieure à 60 °C pour produire l'ECS, ce qui entraîne des températures de retour primaire plus élevées.

2.2.2 Configuration parallèle

La configuration parallèle est la plus répandue. Deux échangeurs fonctionnent séparément pour le chauffage des locaux et l'ECS et partagent la même conduite de départ à la même température.

Chaque échangeur dispose de son propre système de régulation, avec des consignes de température de départ secondaire distinctes.

Cette configuration est simple à installer et à réguler et présente un coût relativement faible.

2.2.3 Configuration en série

Une sous-station en série comprend deux échangeurs, respectivement pour le chauffage des locaux et l'ECS. Cette configuration permet d'utiliser la température de retour primaire d'un échangeur pour couvrir, totalement ou partiellement, les besoins de l'autre.

Selon la température nécessaire au chauffage, l'échangeur d'ECS alimente celui du chauffage ou est lui-même alimenté par celui-ci. En effet, la température d'alimentation de l'ECS est d'environ 55 à 60 °C. Si les émetteurs de chauffage ont besoin d'une température inférieure, le retour primaire de l'échangeur d'ECS peut alimenter l'échangeur de chauffage. À l'inverse, si les émetteurs nécessitent une température supérieure, le retour de l'échangeur de chauffage peut alimenter l'échangeur d'ECS.

La configuration en série est plus complexe à installer en raison de la complexité de sa régulation.

2.2.4 Configuration à deux étages

Une sous-station à deux étages comporte trois échangeurs : deux en parallèle, respectivement pour le chauffage et l'ECS, et un troisième raccordé au retour des deux autres, utilisé pour préchauffer l'ECS. Cette configuration abaisse la température globale de retour primaire et améliore ainsi l'efficacité du réseau de chaleur.

La configuration à deux étages combine les avantages des architectures parallèle et en série. Elle reste facile à installer et à réguler tout en abaissant la température de retour primaire. Néanmoins, la configuration parallèle est généralement privilégiée, car le gain d'efficacité ne justifie pas le coût supplémentaire d'un troisième échangeur.

2.2.5 Comparaison des configurations de sous-stations

Configuration	Performance	Coût	Complexité
1 HEX	--	+	0
Parallèle	+	+	+
Série	-	-	--
Cascade / deux étages	++	--	-

2.3 Architectures des réseaux primaires

Une fois le réseau secondaire et la sous-station dimensionnés, il faut dimensionner le réseau primaire. Cette section présente les différentes configurations possibles et les principes de conception des canalisations.

Les canalisations primaires acheminent l'eau chaude depuis la centrale de production vers les sous-stations et ramènent l'eau refroidie en sens inverse. Selon les stratégies d'exploitation, la conception du réseau primaire peut toutefois être plus complexe et intégrer plusieurs canalisations à des niveaux de température différents.

2.3.1 Réseau à deux tubes

La configuration de base à deux tubes est généralement utilisée pour fournir l'ECS et le chauffage des locaux. Les deux conduites sont parallèles : l'une assure le départ chaud, l'autre le retour tiède. C'est l'architecture la plus simple et la moins coûteuse. La température de départ est définie selon le besoin le plus élevé des sous-stations. Lorsque le réseau alimente également des sous-stations nécessitant une température plus basse, celles-ci reçoivent toujours suffisamment de chaleur, mais le réseau ne bénéficie pas des températures de retour plus faibles.

2.3.2 Réseau à trois tubes

Pour améliorer les performances du réseau, une troisième canalisation parallèle peut être ajoutée afin de fournir de la chaleur à des températures distinctes. Une conduite peut, par exemple, alimenter le chauffage ou l'ECS et une autre les sous-stations raccordées à des bâtiments équipés d'émetteurs basse température. L'installation coûte davantage, mais les pertes thermiques dans les canalisations peuvent être réduites.

2.3.3 Réseau à trois tubes en cascade

La conduite de retour d'une sous-station à haute température sert à alimenter une sous-station ayant des besoins à température plus faible. Cette disposition réduit les pertes de chaleur et la température de retour.

2.3.4 Réseau à quatre tubes

Pour un réseau capable de fournir simultanément le chauffage des locaux, l'ECS et le refroidissement, quatre canalisations parallèles sont utilisées. Deux conduites servent au chauffage (départ chaud et retour tiède), tandis que deux autres alimentent le refroidissement (départ froid et retour réchauffé). Tous les besoins peuvent ainsi être satisfaits simultanément.

2.4 Questions d'autoévaluation

Choisissez la meilleure réponse. Le corrigé figure ci-dessous.

1. Pourquoi une faible température de retour primaire est-elle souhaitable dans un réseau de chaleur ?

- A. Elle permet au réseau de fonctionner uniquement à la vapeur
- B. Elle améliore la performance globale du réseau de chaleur
- C. Elle supprime le besoin d'échangeurs de chaleur
- D. Elle impose des températures de départ secondaire plus élevées

2. Quelle configuration de sous-station est présentée comme la plus répandue dans le guide ?

- A. Configuration à un échangeur
- B. Configuration parallèle
- C. Configuration en série
- D. Configuration à deux étages

3. Quel est le principal avantage d'une sous-station à deux étages ?

- A. Elle supprime la production d'ECS
- B. Elle augmente la température globale de retour primaire
- C. Elle abaisse la température globale de retour primaire en préchauffant l'ECS
- D. Elle n'utilise qu'un seul échangeur

4. Quelle est la principale caractéristique d'un réseau primaire classique à deux tubes ?

- A. Une conduite de départ chaud et une conduite de retour tiède
- B. Deux conduites de départ chaud à des températures différentes
- C. Deux conduites pour le chauffage et deux pour le refroidissement
- D. La conduite de retour sert toujours de deuxième conduite de départ

5. Quelle configuration de réseau primaire peut fournir simultanément le chauffage et le refroidissement ?

- A. Réseau à deux tubes
- B. Réseau à trois tubes

- C. Réseau à quatre tubes
- D. Réseau à un tube

Corrigé

1	2	3	4	5
B	B	C	A	C

Note sur les sources : le texte théorique provient du guide pédagogique SHaKE approuvé du module 2 et suit les thèmes de la présentation O2 sélectionnée. Les références complètes figurent dans le guide original.

Module 3 : Production de chaleur

Orientation professionnelle : Choix technologiques et intégration

Auteurs et contributeurs : Ghad Alarnaout-Alarnaout, Dr Adrián Mota-Babiloni (Universitat Jaume I de Castellón) ; Balázs Bokor (Université de technologie et d'économie de Budapest)

3.1 Récupération et classification de la chaleur fatale

La chaleur fatale désigne l'énergie thermique produite mais non utilisée efficacement dans les procédés industriels, commerciaux ou résidentiels. Cette chaleur est souvent rejetée dans l'environnement par les gaz d'échappement, les fluides de refroidissement, etc. Pourtant, ces flux thermiques peuvent encore contenir une quantité importante d'exergie et être valorisés grâce à différentes technologies [1]. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat considère la récupération de chaleur fatale comme un moyen d'améliorer l'efficacité énergétique [2], en réduisant la consommation d'énergie des procédés industriels et, par conséquent, leurs émissions de gaz à effet de serre. La chaleur fatale constitue ainsi une possibilité d'amélioration de l'efficacité énergétique encore trop peu exploitée.

La chaleur fatale peut être classée selon son origine, car les procédés industriels, commerciaux et naturels génèrent des excédents de chaleur à différentes températures. Les principales sources sont les suivantes :

Chaleur fatale industrielle :

- a) Fabrication d'acier, de ciment et de verre.
- b) Industrie chimique et raffinage du pétrole.
- c) Transformation alimentaire et fabrication de papier.

Chaleur fatale issue de la production d'énergie :

- a) Centrales thermiques (charbon, gaz naturel, biomasse).
- b) Moteurs à combustion interne et turbines à gaz.

Chaleur fatale des secteurs commercial et résidentiel :

- Systèmes CVC, réfrigération et production d'eau chaude.

Chaleur fatale des transports :

- Gaz d'échappement des moteurs et pertes par frottement dans les véhicules.

Même les systèmes d'énergie renouvelable produisent de la chaleur fatale récupérable. Selon sa température et ses possibilités de valorisation, la chaleur fatale est généralement répartie en trois ou quatre catégories :

Niveau de température	Exemples
Chaleur fatale à basse température (< 100 °C)	Exemples : rejets des tours de refroidissement et des systèmes CVC ; chaleur fatale des eaux usées industrielles ; chaleur des systèmes de réfrigération et de climatisation ; fumées à basse température (transformation alimentaire, brasseries).
Chaleur fatale à température moyenne (100 à 300/400 °C)	Exemples : gaz d'échappement des moteurs à combustion interne et des turbines ; chaleur des chaudières, fours et procédés de séchage ; procédés chimiques et de raffinage ; coulée de l'acier et des métaux.
Chaleur fatale à haute température (> 300/400 °C)	Exemples : gaz d'échappement des industries sidérurgique, cimentière et verrière ; chaleur de la fusion et du raffinage des

Niveau de température	Exemples
	métaux ; fumées des centrales et incinérateurs ; fours et réacteurs à haute température.

3.2 Valorisation de la chaleur fatale

Comme indiqué précédemment, les échangeurs de chaleur sont les technologies les plus couramment utilisées pour récupérer la chaleur fatale. Une fois captée, cette chaleur peut être réutilisée directement ou transformée, à l'aide de technologies actives, en énergie thermique à un autre niveau de température, ou encore en énergie mécanique ou électrique.

3.2.1 Réutilisation

Les échangeurs de chaleur servent non seulement à capter la chaleur fatale, mais également à la valoriser. Ils peuvent être intégrés à des systèmes primaires ou secondaires :

1. Systèmes primaires : un échangeur transfère directement la chaleur du fluide résiduel vers le fluide principal, qui assure ensuite son transport et son utilisation.

2. Systèmes secondaires : la chaleur du fluide résiduel est récupérée par un fluide caloporteur intermédiaire (par exemple de l'eau ou de l'huile), qui alimente ensuite un second échangeur afin de chauffer le fluide principal.

Exemples de réutilisation de la chaleur fatale :

- Générateurs de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) : échangeurs qui récupèrent la chaleur des gaz d'échappement chauds pour produire de la vapeur.
- Économiseurs : échangeurs qui récupèrent la chaleur des fumées ou des fluides de procédé afin de préchauffer l'eau ou l'air.
- Chaudières de récupération : installations semblables à des chaudières à gaz, mais utilisant la chaleur fatale, au lieu du gaz, pour chauffer un fluide utile, généralement de l'eau.

3.2.2 Technologies actives

L'utilisation de la chaleur fatale récupérée pour actionner un cycle thermodynamique constitue une technologie active de récupération. Elle permet de produire de la chaleur à un niveau de température utile différent ou de produire de l'énergie mécanique ou électrique.

La valorisation de la chaleur fatale repose sur deux grandes approches. La première consiste à la convertir en énergie mécanique ou électrique. Les installations les plus courantes fonctionnent selon un cycle de Rankine à vapeur d'eau (SRC) ou un cycle organique de Rankine (ORC) utilisant un fluide organique. Les générateurs thermoélectriques assurent également une conversion directe de la chaleur en électricité. La seconde approche consiste à produire de l'énergie thermique à un autre niveau de température : production de froid par des systèmes frigorifiques à absorption ou à adsorption, ou élévation de la température de la chaleur récupérée grâce aux pompes à chaleur. Ces dernières peuvent être entraînées thermiquement (cycles à absorption ou à adsorption) ou fonctionner par compression de vapeur.

Parmi les technologies courantes figurent le cycle de Rankine à vapeur (SRC), généralement plus intéressant économiquement lorsque la source dépasse 400 °C, ainsi que le cycle organique de Rankine (ORC) ou le cycle de Kalina pour les températures modérées. Les générateurs thermoélectriques présentent des rendements inférieurs mais conviennent aux applications nécessitant de faibles puissances électriques et peu d'entretien.

Cycles à entraînement thermique et cycles à compression de vapeur : les cycles à absorption ou à adsorption peuvent servir à produire du froid (systèmes frigorifiques) ou à atteindre des températures plus élevées (pompes à chaleur). Pour l'élévation de température, le cycle à compression de vapeur est la solution la plus répandue.

3.3 Pompes à chaleur à compression de vapeur

Les pompes à chaleur à compression de vapeur (PACCV) récupèrent la chaleur fatale à basse température et la portent à un niveau de température plus élevé. Elles jouent un rôle important dans la décarbonation par l'électrification de la chaleur et trouvent de nombreuses applications, notamment dans les réseaux de chaleur. COP = puissance thermique au condenseur / puissance du compresseur (généralement de 2 à 6). L'utilisation de chaleur fatale améliore le COP en réduisant l'écart de température à franchir.

Une pompe à chaleur repose sur des principes thermodynamiques fondamentaux. Elle transfère de la chaleur d'une source à basse température vers un milieu à température plus élevée en utilisant de l'énergie extérieure, généralement sous forme de travail électrique ou mécanique.

Deuxième principe de la thermodynamique (énoncé de Clausius) : la chaleur s'écoule naturellement d'un milieu chaud vers un milieu froid. Une pompe à chaleur permet le transfert inverse en fournissant du travail extérieur.

Premier principe de la thermodynamique (conservation de l'énergie) : l'énergie totale du système est conservée :

Qin + W = Qout

Qin = chaleur absorbée de la source à basse température (évaporateur)

W = travail fourni (énergie du compresseur)

Qout = chaleur cédée au milieu à haute température (condenseur)

Dans les systèmes à compression de vapeur, le fluide de travail doit être amené à ébullition à basse température pour produire du froid, puis à la condensation (ou au refroidissement) à haute température pour produire de la chaleur.

Les systèmes à compression de vapeur enchaînent donc plusieurs transformations dans un cycle permettant de produire continuellement le froid ou la chaleur souhaité. Outre le fluide de travail (réfrigérant), leurs principaux composants sont l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le dispositif de détente.

« Le réfrigérant est la substance qui circule de manière cyclique à travers les éléments du système, absorbant de la chaleur à basse température dans l'évaporateur et la libérant à plus haute température dans le condenseur. Ces processus s'accompagnent généralement d'un changement d'état du fluide. »

3.3.1 Principaux composants

1. Évaporateur

Il s'agit d'un échangeur dans lequel le réfrigérant arrive sous forme d'un mélange diphasique à basse température. Le liquide s'évapore à la température de saturation correspondant à la pression régnant dans l'évaporateur, en absorbant dans le milieu environnant la chaleur latente nécessaire à son évaporation.

2. Compresseur

Le réfrigérant entre dans le compresseur à l'état vapeur (généralement surchauffée), à basse pression et basse température. Le compresseur aspire mécaniquement les vapeurs produites dans l'évaporateur, puis les comprime, ce qui augmente leur pression et leur température.

3. Condenseur

Le réfrigérant arrive au condenseur à la sortie du compresseur, sous forme de vapeur surchauffée à haute pression et haute température. Le milieu environnant étant plus froid que la température de saturation du réfrigérant, celui-ci se refroidit puis se condense. La chaleur absorbée dans l'évaporateur ainsi que l'énergie apportée lors de la compression sont alors transférées au milieu environnant, sous forme de chaleur sensible et de chaleur latente de condensation, utilisables pour le chauffage. Le réfrigérant quitte le condenseur à l'état liquide (généralement sous-refroidi), puis rejoint le dispositif de détente ou un réservoir.

4. Détendeur

Dans un cycle à compression de vapeur, le détendeur réduit la pression et la température du réfrigérant en provenance du condenseur. Lors de la détente rapide, le fluide change d'état et forme un mélange liquide-vapeur à basse pression et basse température. Il peut ainsi absorber de nouveau de la chaleur dans l'évaporateur, ce qui ferme le cycle.

3.4 Configurations et raccordements des sources de chaleur fatale

Comme indiqué précédemment, la chaleur fatale peut être classée en plusieurs niveaux de température. La chaleur à basse température, inférieure à 100 °C, est particulièrement adaptée aux pompes à chaleur. Souvent trop froide pour être utilisée directement dans des procédés industriels, elle peut néanmoins contribuer au chauffage des locaux et de l'eau des bâtiments résidentiels et tertiaires, ou à l'amélioration de certains procédés industriels.

Les pompes à chaleur permettent d'élever cette chaleur à un niveau compatible avec les besoins de l'application. La chaleur fatale industrielle à basse température peut notamment être récupérée dans l'eau de refroidissement des procédés. Parmi les applications courantes figurent :

- Distilleries
- Blanchisseries industrielles
- Réseaux de chaleur alimentés par de la chaleur fatale
- Supermarchés
- Centres de données

3.4.1 Raccordement direct à un circuit primaire

Application : cette approche est souvent utilisée lorsque la chaleur fatale provient d'un procédé mettant en circulation un fluide, tel que de l'eau chaude ou des gaz d'échappement.

Configuration : l'échangeur de la pompe à chaleur est directement raccordé au circuit de la source de chaleur fatale. Le fluide résiduel traverse alors l'évaporateur ou le condenseur de la pompe à chaleur.

Avantages : réduction des pertes de température et amélioration de l'efficacité grâce à l'absence d'échangeur intermédiaire.

Inconvénients : nécessité d'une compatibilité complète des matériaux et des températures entre la pompe à chaleur et la source, ce qui peut limiter les possibilités de conception.

3.4.2 Échangeur intermédiaire (système indirect)

Application : cette méthode convient lorsque le fluide porteur de chaleur fatale est corrosif, contaminé ou présente une température dépassant les limites admissibles des équipements de la pompe à chaleur.

Configuration : un échangeur supplémentaire, à plaques ou tubulaire, transfère la chaleur du fluide résiduel vers un fluide intermédiaire, ensuite acheminé vers l'évaporateur de la pompe à chaleur.

Avantages : protection de la pompe à chaleur contre les contaminants et possibilité de moduler la température.

Inconvénients : ajout d'une résistance thermique et nécessité d'un entretien supplémentaire.

3.4.3 Circuit fermé avec fluide caloporteur secondaire

Application : cette approche convient à la récupération de chaleur provenant de plusieurs sources réparties, comme l'air de ventilation des bâtiments ou différents points d'un procédé industriel.

Configuration : un circuit de fluide secondaire collecte la chaleur des diverses sources et l'achemine vers un échangeur raccordé à la pompe à chaleur.

Avantages : récupération simultanée de plusieurs sources et simplification de la gestion thermique des flux de chaleur fatale répartis.

Inconvénients : besoin de canalisations supplémentaires et, éventuellement, de pompes pour le fluide secondaire.

3.4.4 Systèmes de stockage (réservoirs de stockage thermique)

Application : cette configuration est adaptée aux sources de chaleur fatale dont le débit thermique varie ou est intermittent.

Configuration : la chaleur fatale est stockée dans un réservoir thermique auquel la pompe à chaleur est raccordée. La pompe peut y puiser de la chaleur en période de forte demande ou lorsque la source ne fonctionne pas.

Avantages : meilleure valorisation de la chaleur fatale, particulièrement lorsque les besoins de la pompe à chaleur ne coïncident pas avec la disponibilité de la source.

Inconvénients : espace supplémentaire nécessaire pour le réservoir et régulation précise des phases de charge et de décharge thermique.

3.4.5 Intégration aux flux d'air ou de gaz

Application : cette configuration permet de récupérer la chaleur fatale des gaz d'échappement ou des systèmes de ventilation.

Configuration : un échangeur air-eau ou air-réfrigérant est raccordé à l'entrée de la pompe à chaleur, permettant le transfert de chaleur à partir des flux gazeux.

Avantages : récupération efficace de la chaleur sensible (liée à la température) et de la chaleur latente (liée à l'humidité) des gaz d'échappement.

Inconvénients : difficulté à maintenir un transfert thermique optimal, car les débits d'air ou de gaz doivent être réglés avec précision.

3.5 Questions d'autoévaluation

Choisissez la meilleure réponse. Le corrigé figure ci-dessous.

1. Quelle affirmation décrit le mieux la récupération de chaleur fatale ?

- A. Il s'agit du rejet volontaire de chaleur inutilisée dans l'environnement.
- B. Elle consiste à capter la chaleur fatale afin de la réutiliser ou de la convertir en chaleur utile, énergie mécanique ou électricité.
- C. Elle se limite à la chaleur fatale industrielle à haute température.
- D. Elle nécessite une pompe à chaleur dans toutes les applications.

2. Quelle technologie constitue un exemple de réutilisation passive de chaleur fatale ?

- A. Générateur thermoélectrique
- B. Cycle organique de Rankine
- C. Générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG)
- D. Pompe à chaleur à compression de vapeur

3. Quelle est la fonction principale d'une pompe à chaleur à compression de vapeur pour récupérer la chaleur fatale ?

- A. Abaisser la température de la chaleur utile jusqu'à la température ambiante
- B. Porter la chaleur fatale à basse température à un niveau de température utile plus élevé
- C. Transformer directement toute la chaleur fatale en électricité
- D. Supprimer le besoin d'échangeurs de chaleur

4. Quels sont les principaux composants d'un cycle de pompe à chaleur à compression de vapeur ?

- A. Évaporateur, compresseur, condenseur et détendeur
- B. Chaudière, turbine, générateur et tour de refroidissement
- C. Pompe, réservoir de stockage, radiateur et ventilateur
- D. Économiseur, générateur de vapeur de récupération, absorbeur et turbine

5. Dans quel cas un échangeur intermédiaire est-il particulièrement utile ?

- A. Lorsque le fluide de chaleur fatale est corrosif, contaminé ou dépasse les limites des équipements de la pompe à chaleur
- B. Lorsqu'il n'existe aucune différence de température
- C. Uniquement lorsque la source est l'air extérieur
- D. Uniquement lorsque la source de chaleur fatale est parfaitement compatible avec la pompe à chaleur

Corrigé

1	2	3	4	5
B	C	B	A	A

Note sur les sources : le texte théorique est tiré du guide pédagogique SHaKE approuvé du module 3. Les références complètes figurent dans le guide d'origine.

Module 4 : Réseaux de froid

Orientation professionnelle : Technologies de production de froid et couplage sectoriel

Auteurs et contributeurs : Dr Adrián Mota-Babiloni, Ghad Alarnaot Alarnaout | Universitat Jaume I de Castellón

4.1 Groupes frigorifiques

Un groupe frigorifique extrait la chaleur d'un procédé, d'une machine ou d'un bâtiment afin de maintenir une température contrôlée. Un fluide refroidi (souvent de l'eau ou un mélange eau-glycol) circule, absorbe la chaleur de la zone concernée et la transfère vers l'environnement.

Les groupes frigorifiques sont couramment utilisés dans les installations industrielles et commerciales ainsi que dans les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) pour refroidir des équipements, des procédés ou des bâtiments. Leur puissance frigorifique peut atteindre plusieurs centaines ou milliers de kilowatts. Ils sont notamment employés dans l'industrie manufacturière, les établissements de santé, les centres de données et l'industrie agroalimentaire.

4.1.1 Fonctionnement et types de groupes frigorifiques

Comme expliqué dans le guide, l'évaporateur sert à produire de l'eau glacée. L'eau en sort à environ 6 °C et circule dans l'installation grâce à une pompe. Elle retourne ensuite vers l'évaporateur, où le réfrigérant absorbe la chaleur indésirable.

Un autre circuit relie le condenseur à la tour de refroidissement. L'eau entre dans le condenseur à environ 27 °C, ou à la température ambiante, puis en ressort à une température supérieure d'environ 5 °C. Le réfrigérant peut également dissiper directement la chaleur à l'air extérieur à travers une batterie ventilée.

Les groupes frigorifiques sont classés en fonction de leur mode de rejet de chaleur :

- Groupes frigorifiques à condensation par air : des ventilateurs font circuler l'air sur la batterie du condenseur pour évacuer la chaleur. Ils conviennent aux installations de petite ou moyenne taille ou lorsque l'accès à l'eau est limité, notamment dans les systèmes CVC commerciaux.
- Groupes frigorifiques à condensation par eau (centrifuges) : ils utilisent de l'eau et des tours de refroidissement pour rejeter la chaleur plus efficacement. Ils conviennent aux grandes applications industrielles nécessitant de meilleures performances.

Les groupes à condensation par eau, équipés d'une tour de refroidissement, présentent généralement une meilleure efficacité que les groupes à condensation par air, car leur température de condensation dépend de la température humide extérieure, inférieure à la température sèche. Plus la température de condensation est basse, plus le rendement du groupe est élevé.

La présentation professionnelle sélectionnée indique des plages de puissance typiques d'environ 15 à 1 500 kW pour les groupes à condensation par air et de 50 à 10 000 kW pour ceux à condensation par eau.

4.1.2 Principaux indicateurs et efficacité

- Puissance frigorifique (Qo) : mesurée en tonnes de réfrigération ou en kilowatts (kW), elle indique la quantité de chaleur extraite.
- Consommation électrique (Wc) : les compresseurs consomment la majeure partie de l'électricité du système, ce qui rend leur conception essentielle à l'efficacité. Les pompes et les ventilateurs doivent également être pris en compte, car ils peuvent représenter 10 % de la consommation.

- Taux d'efficacité énergétique (EER) : rapport entre la puissance frigorifique fournie et la puissance électrique consommée (kW de froid / kW d'électricité).
- Taux d'efficacité énergétique saisonnier (SEER) : indicateur semblable à l'EER, mais calculé sur l'ensemble d'une saison, comme le rapport entre l'énergie frigorifique produite et l'énergie électrique totale consommée (kWh de froid / kWh d'électricité).

Le SEER est déterminé à partir d'une température intérieure de référence, de différentes températures extérieures et de plusieurs niveaux de charge afin de représenter les conditions réelles. La norme EN 14825 définit la méthode d'essai. La classe d'efficacité énergétique dépend du SEER et du type d'équipement, de A+++ à G, A+++ désignant la classe la plus efficace.

Source / charge	**100%**	**74%**	**47%**	**21%**
Source air	35°C	30°C	25°C	20°C
Source eau	30°C	26°C	22°C	18°C

Les performances du système dépendent de sa bonne conception et de son installation par des professionnels, de l'entretien régulier, de la taille et de l'efficacité énergétique du bâtiment climatisé, du dimensionnement et du débit d'air du système, de sa durée quotidienne d'utilisation et des températures intérieure et extérieure.

Dans les réseaux de froid, des groupes frigorifiques à condensation par eau de forte puissance sont fréquemment choisis. Le stockage d'énergie thermique permet d'adapter la production de froid aux variations horaires de la demande du réseau.

4.2 Machines frigorifiques à absorption

Les groupes frigorifiques à absorption ne comportent pas de compresseur mécanique. Ils utilisent une source de chaleur, par exemple l'énergie solaire ou la chaleur fatale, pour entraîner le cycle frigorifique. La fonction principale de compression n'exige donc pas d'électricité. Ces machines sont également moins bruyantes et produisent moins de vibrations, puisqu'elles comportent peu d'éléments mobiles. Elles utilisent des réfrigérants naturels.

Les systèmes frigorifiques à absorption sont entraînés par une source thermique plutôt que par le travail mécanique d'un compresseur. Ils emploient généralement un réfrigérant et un fluide absorbant.

4.2.1 Principaux composants

- Évaporateur : le réfrigérant y absorbe de la chaleur et s'évapore.
- Absorbeur : la vapeur de réfrigérant y est absorbée par le fluide absorbant.
- Générateur : la chaleur sépare le réfrigérant de l'absorbant et régénère ainsi le réfrigérant.
- Condenseur : le réfrigérant y cède de la chaleur et se condense à l'état liquide.

4.2.2 Paramètres caractéristiques

- Puissance frigorifique (Qo) : chaleur extraite par l'évaporateur du local ou du procédé refroidi, généralement exprimée en kW.
- Apport thermique (Qg) : chaleur nécessaire à l'entraînement du cycle à absorption, fournie notamment par le gaz naturel, la chaleur fatale ou l'énergie solaire, généralement exprimée en kW.
- Coefficient de performance (COP) : rapport entre la puissance frigorifique (Qo) et l'apport thermique (Qg).

Le COP est un indicateur essentiel de l'efficacité énergétique : plus il est élevé, plus le système est efficace. Dans les machines frigorifiques à absorption, il est généralement compris entre 0,5 et 1,5, soit des valeurs nettement inférieures à celles des systèmes à compression de vapeur.

4.2.3 Comparaison avec les systèmes à compression de vapeur

Systèmes à compression	**Systèmes à absorption**
Entraînement mécanique	Entraînement thermique
COP élevé	COP faible (maximum actuel ≈ 1,4)
Performances (COP et puissance) très sensibles à la température de l'évaporateur	Performances peu sensibles à la température de l'évaporateur
Le COP diminue fortement à charge partielle	Le COP varie peu avec la charge
La présence de liquide en sortie d'évaporateur peut endommager le compresseur	Le liquide en sortie d'évaporateur ne pose pas de problème majeur
Performances sensibles à la surchauffe à l'évaporateur	La surchauffe à l'évaporateur a peu d'importance
Nombreuses pièces mobiles	Très peu de pièces mobiles
Entretien régulier nécessaire	Très peu d'entretien nécessaire
Bruit et vibrations plus élevés	Bruit et vibrations plus faibles
Petits systèmes compacts et grands systèmes encombrants	Petits systèmes encombrants et grands systèmes compacts
Économique lorsque l'électricité est disponible	Économique lorsque des combustibles bon marché ou de la chaleur fatale sont disponibles

4.3 Stockage d'énergie thermique (TES)

Le stockage d'énergie thermique (TES) permet de conserver de la chaleur ou du froid pour un usage ultérieur, en dissociant la production de la consommation. Le principe est comparable à celui d'une batterie électrique, mais consiste à stocker de la chaleur ou du « froid » par une variation de température d'un fluide ou par un changement de phase (généralement solide-liquide et inversement). La chaleur ou le froid peut donc être produit lorsque de l'électricité renouvelable excédentaire ou de la chaleur fatale est disponible, puis consommé en fonction des besoins. Cette solution est particulièrement intéressante dans les réseaux de froid, où la production centralisée ou la récupération de froid ne coïncide pas nécessairement avec les besoins des utilisateurs.

4.3.1 Principal avantage du stockage thermique dans les réseaux de froid

Dans les réseaux de froid, le stockage thermique consiste généralement à accumuler de l'énergie frigorifique dans un réservoir d'eau isolé. Le réservoir est refroidi ou gelé pendant les périodes creuses (nuits ou week-ends), puis réchauffé ou dégelé pendant les périodes de pointe (jours ouvrés).

Cela permet de réduire les besoins en groupes frigorifiques de forte puissance pendant les pointes, puisque le stockage couvre une partie ou la totalité de la charge. La capacité frigorifique disponible hors pointe sert à charger le stockage tout en couvrant les besoins du moment. Des groupes de puissance plus faible permettent de réduire les coûts d'investissement et d'exploitation ainsi que les contraintes sur le réseau électrique.

4.3.2 Types de stockage thermique

Les technologies de stockage de froid comprennent notamment le stockage par chaleur latente (glace et matériaux à changement de phase, MCP), le stockage par chaleur sensible (eau glacée et fluides à basse température) et le stockage thermochimique, fondé sur des réactions chimiques. Le stockage dans les sondes géothermiques et les aquifères peut être utilisé à long terme.

	Réservoir de stockage de glace	Réservoir d'eau glacée	Réservoir de liquide à basse température
Type de stockage	Chaleur latente	Chaleur sensible	Chaleur latente
Température de décharge	1°C à 7°C	4°C à 6°C	-1°C à 2°C
Température de recharge	-8°C à -2°C	4°C à 6°C	-1°C à 2°C
Puissance de la centrale frigorifique de recharge	0.8 to 1.1 kW/ton (0.23 to 0.31)	0.6 to 0.7 kW/ton (0.23 to 0.31)	0.7 to 0.8 kW/ton (0.23 to 0.31)

L'intégration d'un stockage thermique dans un réseau de froid permet notamment de réduire la puissance frigorifique installée, d'éviter la consommation aux heures où l'électricité coûte le plus cher, de diminuer les émissions de CO_2 grâce à une meilleure efficacité d'exploitation et de dimensionner une centrale frigorifique plus petite, une partie de l'énergie frigorifique nécessaire étant déjà stockée.

4.4 Questions d'autoévaluation

Choisissez la meilleure réponse. Le corrigé figure ci-dessous.

1. Quel type de groupe frigorifique utilise de l'eau et des tours de refroidissement pour évacuer la chaleur plus efficacement ?

- A. Groupe frigorifique à condensation par air
- B. Groupe frigorifique à condensation par eau
- C. Uniquement un groupe frigorifique à absorption
- D. Groupe frigorifique thermoélectrique

2. Que représente le taux d'efficacité énergétique (EER) ?

- A. Le rapport entre le froid produit et l'énergie électrique consommée
- B. Le rapport entre l'apport thermique et la puissance frigorifique
- C. Le rapport entre la demande annuelle de froid et la surface de plancher
- D. Le rapport entre le débit d'eau et la puissance du compresseur

3. Quelle est la principale source d'énergie motrice d'une machine frigorifique à absorption ?

- A. Le travail mécanique d'un compresseur
- B. Une source de chaleur, telle que la chaleur fatale, l'énergie solaire ou le gaz naturel
- C. Uniquement l'air ambiant
- D. Uniquement l'eau glacée

4. Quelle plage de COP est indiquée pour les systèmes frigorifiques à absorption ?

- A. 0,1–0,3
- B. 0,5–1,5
- C. 2–6
- D. 8–15

5. Quel est le principal avantage du stockage thermique (TES) dans les réseaux de froid ?

- A. Il augmente la puissance frigorifique nécessaire en période de pointe
- B. Il décale la production de froid vers les périodes creuses et réduit les besoins de puissance en pointe
- C. Il supprime le besoin d'eau glacée
- D. Il ne peut être utilisé qu'avec les groupes frigorifiques à condensation par air

Corrigé

1	2	3	4	5
B	A	B	B	B

Note sur les sources : le texte théorique est tiré du guide pédagogique SHaKE approuvé du module 4 ; les plages de puissance et la brève note relative à l'intégration dans les réseaux de froid proviennent de la présentation O2 sélectionnée. Les références complètes figurent dans les documents d'origine.

Module 5 : Systèmes avancés en chauffage et climatisation urbains

Orientation professionnelle: Exploitation, régulation, numérisation et diagnostic des dysfonctionnements

Auteurs et contributeurs : Dr Antoine Fabre, Dr Pascal Stabat | Mines Paris – PSL

5.1 Importance de la détection des dysfonctionnements

Pour atteindre les objectifs européens relatifs aux réseaux de chaleur et de froid (RDC), les performances des réseaux existants doivent être améliorées. Pour les réseaux de chaleur, cela signifie principalement augmenter la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. En pratique, cette amélioration passe généralement par l'abaissement de la température globale de retour du réseau, ce qui permet de mieux valoriser les sources renouvelables à basse température, telles que la géothermie et la chaleur fatale, tout en réduisant les pertes thermiques des canalisations et la consommation d'énergie des pompes primaires.

Cependant, l'approvisionnement en chaleur des RDC dépendant de nombreux composants de régulation, mécaniques et hydrauliques, des dysfonctionnements peuvent survenir. Un équipement inadapté ou défectueux, quelle que soit sa position dans le réseau, peut dégrader la température globale de retour. Avant d'envisager l'optimisation de la régulation, il est donc essentiel de vérifier le bon fonctionnement du réseau. Selon une étude portant sur deux réseaux suédois [1], seules 26 % des sous-stations fonctionnaient correctement. Les dysfonctionnements des sous-stations ne perturbent pas nécessairement la fourniture de chaleur, mais ils peuvent affecter sensiblement les performances globales du RDC.

5.1.1 Aperçu des défauts dans les RDC

Du fait de la complexité de l'exploitation des RDC, les causes des dysfonctionnements sont très diverses. Elles sont réparties en cinq catégories selon leur localisation ou leur nature : fuites, défauts des systèmes secondaires (installations des clients), défauts des vannes de régulation et des actionneurs des sous-stations, défauts des systèmes de régulation et des régulateurs, et défauts des échangeurs de chaleur. Les deux principales sources de dysfonctionnement semblent être les fuites et les problèmes des systèmes hydrauliques des clients.

Catégorie de défaut	Part approximative relevée
Fuites	41.54%
Systèmes secondaires	31%
Vanne de régulation et actionneur	22.09%
Systèmes de régulation et régulateur	5%
Échangeurs de chaleur	0.37%

Les problèmes recensés par les exploitants des RDC associent de véritables dysfonctionnements et des configurations inadaptées des installations hydrauliques des clients. Pratiquement tous ont un effet sur le confort thermique du client et/ou la température de retour primaire. Leur correction est donc essentielle.

5.1.2 Données disponibles et difficultés de détection des dysfonctionnements

Identifier la cause des dysfonctionnements d'un réseau de chaleur constitue un défi majeur pour les exploitants et les gestionnaires. Ces réseaux, systèmes thermiques complexes et étendus, sont soumis à de nombreuses incertitudes liées aux conditions d'exploitation, à la variabilité des charges thermiques, à l'état des équipements et aux interactions entre les sous-stations et le réseau principal. La littérature scientifique souligne le fort couplage hydraulique et thermique de ces systèmes, qui rend difficile l'analyse indépendante de chaque composant.

Les perturbations observées — baisses de température, pertes de pression ou consommation énergétique excessive — peuvent avoir de multiples causes : fuites, blocage de vannes, mauvais équilibrage hydraulique, capteurs défectueux ou erreurs de régulation. Or, des symptômes similaires peuvent correspondre à des causes différentes, ce qui complique particulièrement leur identification précise. De plus, l'absence de données en temps réel ou leur faible résolution dans certains réseaux anciens limitent encore les possibilités de diagnostic automatisé.

En effet, seules quelques données sont réglementairement obligatoires et habituellement disponibles au niveau des sous-stations :

- Températures de départ et de retour primaires
- Température de départ secondaire
- Puissance échangée au niveau de la sous-station
- Débit primaire

Pour mieux comprendre le fonctionnement des sous-stations, d'autres données sont toutefois particulièrement nécessaires, notamment la température de retour secondaire et le débit massique secondaire. La température de retour de chaque émetteur serait également très utile.

5.2 Détection des anomalies et détection des défauts

Qu'il s'agisse des outils utilisés par les exploitants ou de ceux proposés dans la littérature, deux grandes approches se dégagent : la détection des anomalies et la détection des défauts. La première recherche des configurations de données qui s'écartent d'un comportement « normal » préalablement défini. Elle permet de repérer les valeurs aberrantes, les écarts dans les mesures et les comportements atypiques. Elle ne permet cependant pas d'en déterminer directement l'origine ni de corriger le système. De plus, la définition du comportement normal nécessaire à cette approche peut être complexe.

La deuxième approche consiste à détecter les défauts effectifs, c'est-à-dire à identifier les changements empêchant le fonctionnement correct du système. Elle permet de retrouver la cause du dysfonctionnement et, ainsi, d'y remédier, mais sa mise en œuvre est plus difficile.

La détection des anomalies ou des défauts peut faire appel à cinq méthodes [8] :

- Visualisation et analyse manuelle
- Seuils
- Régression
- Classification
- Regroupement (clustering)

Chaque méthode peut être utilisée seule ou en combinaison avec d'autres.

5.2.1 Comportement normal et détection des anomalies

La visualisation et l'analyse manuelle sont les méthodes les plus simples et les plus anciennes de détection des anomalies. Des experts examinent les mesures des sous-stations ou des indicateurs

calculés, souvent à l'aide d'outils de visualisation. Cette méthode offre une grande souplesse grâce au jugement de l'expert, mais reste subjective. En pratique, l'analyse manuelle sert à détecter des anomalies et des défauts, ou à approfondir l'examen de problèmes préalablement repérés par d'autres méthodes.

Par exemple, une méthode consiste à comparer le comportement d'une sous-station de référence, réputée fonctionner sans problème majeur, avec celui des autres. La charge thermique horaire moyenne est censée évoluer linéairement avec la température extérieure, en raison de la sensibilité thermique du chauffage des locaux, puis rester constante lorsque la température extérieure est suffisamment élevée pour que le chauffage ne soit plus nécessaire. Le débit d'eau horaire moyen devrait être stable et plus élevé en saison froide. Dans une sous-station défectueuse, la charge thermique horaire moyenne est moins linéaire que prévu et le débit d'eau devient instable, ce qui indique un problème.

Toutes ces approches dépendent donc d'une référence décrivant le fonctionnement normal, d'un seuil de détection adapté et de données de qualité suffisante.

5.2.2 Classification et détection des défauts par apprentissage automatique

La classification est une tâche d'apprentissage automatique consistant à affecter une observation à l'une de plusieurs catégories prédéfinies. Bien que différentes techniques puissent être utilisées, cette catégorie désigne ici les algorithmes de classification qui déterminent directement si un défaut est survenu et, le cas échéant, son type. Contrairement aux modèles de régression qui produisent des valeurs numériques continues, les classificateurs attribuent aux données des classes discrètes, généralement représentées par des étiquettes entières. À la différence du regroupement, qui fonctionne avec des données non étiquetées, la classification nécessite des exemples étiquetés de défauts connus pour l'entraînement. Les algorithmes courants comprennent les réseaux de neurones, les arbres de décision et les machines à vecteurs de support.

Il devient donc nécessaire de recourir à des approches hybrides associant modélisation physique, analyse des données et techniques d'apprentissage automatique pour améliorer la localisation et la compréhension des anomalies. Toutefois, même ces approches innovantes restent tributaires de la qualité des données disponibles et d'une connaissance détaillée du réseau étudié.

5.3 Exemple de détection d'un défaut : encrassement d'un échangeur de chaleur

Fabre et al. [4] ont proposé un indicateur permettant de détecter l'encrassement d'un échangeur de chaleur. Pour construire cet indicateur, on suppose d'abord que la plupart des échangeurs utilisés dans les réseaux de chaleur sont des échangeurs à plaques à contre-courant. La signature caractéristique de l'encrassement est l'augmentation de la résistance thermique globale de l'échangeur.

Selon la corrélation de Dittus-Boelter, le coefficient de transfert thermique convectif peut être exprimé en fonction du débit massique. En supposant négligeable la résistance thermique conductrice des plaques, la résistance thermique sans encrassement évolue linéairement avec la variable liée au débit massique utilisée par l'indicateur. Lorsque l'encrassement apparaît, la résistance thermique globale n'évolue plus de manière linéaire.

Il faut également définir un seuil au-delà duquel l'encrassement dégrade sensiblement les performances de la sous-station. Selon l'étude, la température de retour baisse de plus de 5 °C lorsque le rapport entre les résistances thermiques avec et sans encrassement dépasse 1,4. Une variation de 5 °C est jugée suffisamment importante pour dégrader notablement les performances.

La résistance thermique sans encrassement peut être calculée à partir des données mesurées — températures des deux côtés et puissance échangée — immédiatement après un nettoyage complet de l'échangeur. Ces mêmes données permettent de calculer la résistance thermique en cours de fonctionnement. En mesurant les températures et les débits des deux côtés, on peut ainsi tracer l'évolution de la résistance thermique et le seuil à ne pas dépasser. Lorsque la résistance mesurée franchit le seuil, l'effet de l'encrassement justifie un nettoyage.

Cet indicateur permet de détecter un défaut précis ; il est facile à utiliser et a été validé à partir de données de terrain. Il nécessite toutefois des données du côté secondaire.

5.3.1 Perspective opérationnelle

En conclusion, l'amélioration des performances des RDC suppose d'abord de choisir les systèmes hydrauliques les mieux adaptés du côté bâtiment, puis de détecter rapidement et précisément les dysfonctionnements.

La présentation professionnelle résume la démarche opérationnelle ainsi : améliorer et réparer les composants hydrauliques du côté secondaire ; améliorer et réparer ceux du côté primaire ; puis optimiser l'exploitation du RDC.

5.4 Questions d'autoévaluation

Choisissez la meilleure réponse. Le corrigé figure ci-dessous.

1. Dans l'étude suédoise citée dans le module, quelle proportion approximative des sous-stations fonctionnait correctement ?

- A. 26%
- B. 50%
- C. 74%
- D. 90%

2. Quelle affirmation décrit le mieux la détection des anomalies ?

- A. Elle identifie toujours la cause première d'un défaut
- B. Elle repère les configurations qui s'écartent du comportement normal attendu
- C. Elle détecte uniquement les fuites d'eau
- D. Elle ne nécessite pas de données de référence

3. Quelles données sont considérées comme particulièrement nécessaires pour mieux comprendre le fonctionnement d'une sous-station ?

- A. Uniquement la température extérieure et le prix de l'électricité
- B. La température de retour secondaire et le débit massique secondaire
- C. Uniquement la température de départ primaire
- D. La surface du bâtiment et son occupation

4. Laquelle des propositions suivantes ne fait PAS partie des cinq méthodes de détection des dysfonctionnements présentées dans le module ?

- A. Régression
- B. Classification
- C. Regroupement
- D. Analyse de combustion

5. Quelle signature spécifique est utilisée dans l'indicateur d'encrassement de l'échangeur présenté ?

- A. Une baisse de la pression du réseau uniquement

- B. Une augmentation de la résistance thermique globale de l'échangeur
- C. Une consommation d'électricité constante
- D. Une baisse de la température extérieure

Corrigé

1	2	3	4	5
A	B	B	D	B

Note sur les sources : le contenu théorique provient du guide pédagogique SHaKE validé du module 5 et suit les thèmes de la présentation O2 consacrés à la détection des dysfonctionnements. Le bref résumé opérationnel en fin de section 3 reprend la diapositive de conclusion de la présentation sélectionnée. Les références complètes figurent dans le guide du module 5 et la présentation correspondante.

Module 6 : Rénovation des systèmes de chauffage urbain

Orientation professionnelle : Réseaux anciens et gestion de la demande côté client

Auteurs et contributeurs : Dr Balázs Bokor, Zoltán Takács | Université de technologie et d'économie de Budapest

6.1 Rôle du chauffage urbain et nécessité de rénovation

Les systèmes de chauffage urbain constituent un élément essentiel des infrastructures énergétiques urbaines : ils centralisent la production de chaleur et distribuent l'énergie thermique à plusieurs utilisateurs au moyen de réseaux de canalisations isolées. Ils permettent des économies d'échelle, facilitent l'intégration de grandes sources de chaleur et peuvent réduire les émissions urbaines par rapport au chauffage individuel. Toutefois, de nombreux réseaux européens ont été construits il y a plusieurs décennies, selon des hypothèses de conception et des régimes de prix de l'énergie très différents des objectifs actuels de décarbonation. Leur modernisation et leur rénovation sont donc urgentes : elles permettent non seulement de retrouver de l'efficacité énergétique, mais aussi d'intégrer des sources de chaleur à faible exergie, des systèmes de régulation intelligents et de nouveaux modèles économiques, faisant du chauffage urbain une technologie centrale des villes sobres en carbone. Ce chapitre présente les dimensions techniques, économiques et institutionnelles de cette rénovation.

6.1.1 Contexte historique et réseaux anciens

De nombreux réseaux de chauffage urbain, notamment en Europe de l'Est et dans les anciens pays soviétiques, ont été conçus à une époque où l'énergie primaire était relativement bon marché. Ils étaient dimensionnés pour de grands ensembles résidentiels peu isolés. Ces systèmes « à haute température » fonctionnaient généralement avec des températures de départ de 100 à 130 °C et de retour d'environ 60 à 70 °C, utilisaient des canalisations isolées de grand diamètre et dépendaient souvent de centrales à combustibles fossiles ou de grandes unités de cogénération. Ces caractéristiques étaient adaptées aux fortes demandes de chaleur et à l'isolation limitée des bâtiments de l'époque, mais sont aujourd'hui problématiques : pertes de distribution élevées, faible efficacité pour les bâtiments récents à basse consommation et inadéquation avec les sources de chaleur à faible exergie, comme la géothermie, la chaleur ambiante, la chaleur fatale industrielle ou les grandes pompes à chaleur.

Les premiers réseaux de chaleur posent d'importants défis au regard des exigences actuelles. Les températures de départ élevées et l'isolation insuffisante des canalisations entraînent des pertes thermiques importantes, qui s'aggravent avec le temps. Ces réseaux sont en outre peu compatibles avec les sources de chaleur à faible exergie comme le solaire thermique, la géothermie et les pompes à chaleur. Les coûts élevés de maintenance nuisent également à leur efficacité. Du côté des consommateurs, la rénovation croissante des bâtiments réduit les quantités d'énergie à transporter, ce qui rend indispensable une régulation adaptée de la pression. Ces réseaux sont donc moins bien adaptés aux bâtiments modernes à faible consommation et aux ensembles résidentiels.

6.2 Rénovation des installations côté bâtiment

La rénovation d'un réseau de chaleur ne s'arrête pas aux canalisations de la rue : elle doit aussi concerner les bâtiments. Une démarche globale de modernisation repose sur plusieurs stratégies essentielles :

Une étape fondamentale consiste à réduire les besoins de chaleur par l'amélioration de l'isolation : isolation des murs, remplacement des fenêtres à simple vitrage, isolation des combles et des toitures.

Cela réduit directement les pointes de demande et permet au réseau de fonctionner à des températures plus basses. Le document SHaKE souligne que l'isolation des bâtiments est primordiale pour réussir la transition vers le chauffage urbain à basse température.

Lorsque les températures de départ diminuent, les émetteurs des bâtiments doivent être compatibles. Les radiateurs de plus grande surface et les planchers chauffants conçus pour les basses températures conviennent mieux. Lors de la planification des rénovations, il faut vérifier le dimensionnement des radiateurs, la modernisation des vannes thermostatiques et les modifications des collecteurs afin de garantir des températures intérieures adéquates malgré la baisse de la température d'alimentation.

6.2.1 Rénovation des systèmes monotubes

Dans les systèmes monotubes, un même débit d'eau traverse successivement plusieurs radiateurs, comme le montre la figure 5. Économiques à installer, ils sont néanmoins difficiles à réguler. Selon l'époque et la conception du bâtiment, on rencontre généralement quatre configurations principales. Dans les systèmes monotubes, le même débit d'eau passe successivement par plusieurs radiateurs. Bien que peu coûteux à installer, ces systèmes sont réputés difficiles à réguler. Selon l'époque et la conception du bâtiment, quatre configurations principales peuvent être distinguées.

Type A – Circulation directe : forme la plus simple et la plus ancienne. Tout le débit massique traverse chaque radiateur de la colonne. Si un occupant ferme son radiateur (ce qui est souvent impossible sans dérivation), toute la colonne cesse de fonctionner.

Type B – Radiateur avec dérivation : une conduite de dérivation permet à une partie de l'eau de contourner le radiateur, offrant une régulation élémentaire de la température sans interrompre la circulation vers les autres logements.

Type C – Dérivation décalée avec clapet anti-retour : configuration plus évoluée où la géométrie de la dérivation et une vanne spécifique permettent de privilégier le passage par le radiateur ou par la dérivation.

Type D – Dérivation décalée avec vanne trois voies : configuration ancienne la plus élaborée, permettant un mélange proportionnel précis entre le radiateur et la dérivation pour améliorer le confort thermique.

6.2.2 Sous-stations compactes et modulaires

Dans les réseaux de chauffage urbain de deuxième génération, les sous-stations étaient généralement construites sur place. Leur réalisation nécessitait une main-d'œuvre importante et une tuyauterie sur mesure, et les installations étaient difficiles à standardiser et à entretenir. Les rénovations modernes recourent à la technologie de troisième génération, caractérisée par des sous-stations modulaires préfabriquées, comme le montre la figure 8.

Ces unités sont testées en usine et livrées prêtes à être raccordées, avec différentes performances selon les besoins du bâtiment. Une sous-station modulaire moderne regroupe généralement les principaux composants dans un châssis compact :

- Échangeurs de chaleur à plaques : transfert thermique rapide et rendement élevé.
- Pompes à vitesse variable : adaptation automatique du débit à la demande réelle pour économiser l'électricité.
- Vannes de réglage des performances : régulation précise du fluide caloporteur.
- Vases d'expansion : gestion sûre des variations de pression dans l'installation.

6.3 Transition vers les réseaux de chaleur à basse température

La transition vers les réseaux de chaleur à basse température (LTDH), souvent considérés comme la quatrième génération, représente un changement fondamental dans la distribution de l'énergie en milieu urbain. Contrairement aux réseaux anciens utilisant de la vapeur sous haute pression ou de l'eau très chaude, les systèmes à basse température fonctionnent généralement avec des températures de départ comprises entre 35 et 70 °C, pouvant descendre à 30 °C dans certains réseaux expérimentaux à très basse température. Avec des températures de retour de 20 à 40 °C, l'écart thermique avec le milieu environnant est nettement plus faible. Cette évolution technique n'est pas une simple amélioration progressive : elle constitue une condition préalable à la décarbonation du secteur, car le réseau peut alors fonctionner comme une infrastructure thermique flexible exploitant des sources d'énergie auparavant considérées comme inutilisables.

6.3.1 Adaptations des bâtiments et enjeu de l'eau chaude sanitaire

Pour qu'un bâtiment continue de fonctionner dans un régime à basse température, il faut revoir ses installations de chauffage. Traditionnellement, les radiateurs étaient dimensionnés pour une eau à 90 °C ; à 50 °C, leur puissance thermique diminue sensiblement. Pour compenser cette baisse, la rénovation doit améliorer l'enveloppe thermique — fenêtres, murs et toiture — afin de réduire les besoins de chauffage. Si les pertes thermiques du bâtiment diminuent, les radiateurs existants ou les planchers chauffants peuvent assurer correctement le chauffage à des températures d'entrée plus basses. Les échangeurs de la sous-station doivent également être choisis pour fonctionner avec un faible écart de température ΔT et garantir un transfert thermique maximal même lorsque les températures des circuits primaire et secondaire sont proches.

La préparation de l'eau chaude sanitaire (ECS) est l'une des difficultés techniques majeures. Les températures de départ des réseaux à basse température peuvent être inférieures aux 55–60 °C requis pour la désinfection thermique rapide ; il est donc essentiel de maîtriser le risque lié aux légionelles. Des solutions décentralisées, notamment des dispositifs d'appoint électriques ou de petites pompes à chaleur, permettent d'élever localement la température de l'eau au point d'utilisation. D'autres solutions reposent sur la pasteurisation ou sur des échangeurs instantanés à haut rendement dans les sous-stations d'appartement, afin d'éviter le stockage prolongé de l'eau à des températures favorables au développement bactérien sans imposer une température élevée à l'ensemble du réseau.

6.4 Mesure et facturation de la consommation de chaleur

Pour fonctionner efficacement, un réseau de chaleur doit dépasser la simple fourniture de chaleur et assurer une mesure précise des consommations. Cela nécessite plusieurs composants coordonnés permettant de calculer l'énergie effectivement prélevée par le bâtiment ou l'appartement. Un ensemble moderne de comptage, illustré à la figure 10, comprend plusieurs éléments de précision :

- Un débitmètre : mesure le volume exact de fluide caloporteur traversant l'installation.
- Des sondes de température de départ et de retour : enregistrent la différence de température (ΔT) entre l'eau entrant dans le circuit du consommateur et celle qui en sort.
- Un calculateur : intègre les données de débit et de température pour déterminer l'énergie thermique consommée, généralement exprimée en kilowattheures (kWh) ou en gigajoules (GJ).

Les projets de rénovation modernes permettent de mesurer la consommation de chaleur à plusieurs niveaux. Si le comptage central d'un bâtiment reste habituel pour la facturation globale, une répartition équitable des coûts exige des données plus détaillées. Selon la structure du bâtiment et les besoins de gestion, la mesure peut concerner :

- Le bâtiment entier (point principal de raccordement)

- Des parties du bâtiment (par exemple, ailes distinctes ou commerces en rez-de-chaussée)
- Chaque appartement (responsabilisation directe des occupants)
- Chaque point de consommation (radiateurs individuels ou zones spécifiques)

6.5 Rénovation des réseaux de chaleur urbains : études de cas sélectionnées

6.5.1 Réseau Bunhill Heat and Power, Londres

Le réseau Bunhill Heat and Power, situé dans le borough londonien d'Islington, est un exemple majeur d'innovation énergétique urbaine (figure 12). Il s'agit du premier projet au monde à récupérer avec succès la chaleur fatale d'un réseau de métro — le métro de Londres — pour fournir un chauffage abordable et bas carbone aux habitants et aux bâtiments publics du quartier.

Phase 1 – Mise en place des infrastructures : la première phase reposait sur une centrale de cogénération au gaz située sur Central Street. La chaleur fatale issue de la production d'électricité était récupérée et utilisée pour le chauffage urbain au lieu d'être rejetée dans l'atmosphère. Cette phase a établi le réseau initial, alimentant environ 800 logements ainsi que plusieurs bâtiments publics locaux.

Phase 2 – Récupération innovante de chaleur fatale : l'extension de la deuxième phase marque une étape technologique importante vers les principes des réseaux de quatrième génération. Elle comprend un nouveau centre énergétique implanté près d'un puits de ventilation du métro londonien, à l'angle de Moreland Street et Central Street.

Cette installation utilise une pompe à chaleur de grande puissance (figure 13) pour récupérer directement la chaleur fatale à basse température du système de ventilation du métro. En relevant la température de l'air chaud des tunnels jusqu'à un niveau exploitable par le réseau hydraulique, le projet montre comment transformer la chaleur des tunnels, auparavant gênante, en ressource énergétique.

6.5.2 Projet Citigen, Londres

Le projet Citigen, au cœur du quartier financier de Londres, illustre l'évolution des systèmes énergétiques urbains. Alors que de nombreux réseaux traditionnels reposent sur une seule source d'énergie, Citigen fonctionne comme un pôle énergétique multivecteur, intégrant la production de chaleur, de froid et d'électricité dans un réseau unifié à haut rendement.

Un élément central de la modernisation de Citigen est l'installation d'une pompe à chaleur de 4 MW exploitant une ressource urbaine cachée : l'aquifère londonien (figure 17). Trois forages de 200 mètres de profondeur permettent de capter la chaleur naturelle du sous-sol, dont la température moyenne demeure proche de 14 °C. Cette énergie géothermique est ensuite portée à une température utile par les pompes à chaleur pour le chauffage des locaux et l'eau chaude.

Au-delà de l'exploitation géothermique, le système privilégie la circularité énergétique. Il récupère activement la chaleur fatale issue de la production locale d'électricité et de froid, qui serait autrement rejetée dans l'atmosphère. Cette combinaison de deux sources assure une puissance de chauffage suffisante pour répondre aux besoins d'environ 2 300 logements ou entreprises, tout en ajoutant une capacité frigorifique de 2,8 MW pour le quartier d'affaires environnant.

L'un des aspects techniques les plus avancés de Citigen est sa souplesse d'exploitation. Le centre énergétique comprend un réservoir de stockage thermique de 320 000 litres. Cette « batterie thermique » remplit plusieurs fonctions essentielles :

Écrêtement des pointes : en stockant de l'eau chaude pendant les périodes de faible demande, le système peut couvrir les pics sans surcharger les unités de production de chaleur.

Intégration au réseau électrique : le stockage permet à Citigen de contribuer à l'équilibrage du réseau électrique. Lorsqu'un excédent d'électricité renouvelable est disponible sur le réseau national, par exemple les jours très venteux ou ensoleillés, il peut être utilisé pour alimenter les pompes à chaleur et stocker la chaleur produite pour un usage ultérieur.

6.5.3 Développement des réseaux de chaleur et de froid de Paris

Le paysage énergétique parisien (figure 19) s'articule autour de deux grands réseaux : la CPCU (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain) pour la chaleur et Fraîcheur de Paris pour le froid. Ces réseaux montrent comment une métropole dense peut réaliser des économies d'échelle importantes tout en diversifiant ses sources d'énergie renouvelable et de récupération.

Le réseau CPCU représente une infrastructure d'environ 475 km produisant près de 5 500 GWh de chaleur par an. Son rôle social et institutionnel est considérable puisqu'il alimente l'équivalent de 500 000 ménages, dont la totalité des hôpitaux de la ville, assurant ainsi un chauffage fiable aux infrastructures de santé essentielles. Il dessert également environ 50 % des logements sociaux et 50 % des bâtiments publics.

En complément du réseau de chaleur, Fraîcheur de Paris est l'un des plus grands réseaux de froid urbains au monde (figure 20). D'une puissance frigorifique de 330 MW et d'une production annuelle d'environ 412 GWh, ce réseau de 71 km dessert les centres commerciaux et culturels de la capitale.

6.6 Questions d'autoévaluation

Choisissez la meilleure réponse. Le corrigé figure ci-dessous.

1. Quelle caractéristique correspond à de nombreux anciens réseaux de chaleur à haute température présentés dans le module ?

- A. Des températures de départ généralement comprises entre 100 et 130 °C
- B. L'utilisation exclusive de boucles à température ambiante
- C. Des pompes à chaleur individuelles dans chaque appartement
- D. Aucune perte thermique de distribution

2. Quel est le rôle principal d'une dérivation (bypass) dans un système de chauffage monotube ?

- A. Interrompre toute la colonne de chauffage
- B. Permettre à une partie de l'eau de contourner le radiateur
- C. Augmenter la température de départ du réseau de chaleur
- D. Remplacer le compteur de chaleur

3. Quel composant fait généralement partie d'une sous-station modulaire compacte moderne ?

- A. Un échangeur de chaleur à plaques
- B. Une trémie à charbon
- C. Une turbine à vapeur
- D. Une tour de refroidissement ouverte

4. Pourquoi la préparation de l'eau chaude sanitaire constitue-t-elle un défi technique dans les réseaux de chaleur à basse température ?

- A. Ces réseaux utilisent toujours de la vapeur
- B. Les températures de départ peuvent être trop faibles pour assurer directement la maîtrise du risque de légionelles

- C. Les compteurs de chaleur ne peuvent pas fonctionner au-dessous de 90 °C
- D. Les réseaux à basse température ne peuvent pas utiliser d'échangeurs de chaleur

5. Quelle étude de cas utilise une pompe à chaleur pour valoriser la chaleur fatale du système de ventilation du métro de Londres ?

- A. Citigen
- B. Bunhill Heat and Power Network
- C. CPCU Paris
- D. Fraîcheur de Paris

Corrigé

1	2	3	4	5
A	B	A	B	B

Note sur les sources : le contenu théorique est sélectionné dans le guide pédagogique validé du module 6 de SHaKE et suit les thèmes de la présentation O2 retenue. La formulation du guide source a été conservée dans la mesure du possible ; seuls la sélection propre à la présentation et quelques liens rédactionnels mineurs ont été appliqués.