SHaKE
Sharing Knowledge on Energy Communities

Co-funded by the European Union

Module 4
Réseaux de froid

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

Livret de cours

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

Version : 1.1

Date : mai 2026

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

Projet

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

Auteurs

Dr Adrián Mota-Babiloni, Ghad Alarnaot Alarnaout (Universitat Jaume I de Castellón)

Rédacteurs en chef

Eva Szalma, Dr Adrián Mota-Babiloni, Ghad Alarnaot Alarnaout

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

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

Coordinateur

Université de technologie et d'économie de Budapest, Hongrie

Institutions partenaires

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

Remerciement

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

Licence

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

Citation suggérée :
Universitat Jaume I de Castellón. Module 4 : Réseaux de froid. Projet SHaKE, 2026.

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

Guide pour utiliser le Module 4

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

Le module 4 se concentre sur les systèmes de refroidissement urbain, avec une attention particulière à la production combinée de chaleur et de froid, aux technologies de production de froid, aux fluides frigorigènes, au stockage d'énergie thermique, à l'utilisation de la chaleur fatale, aux applications d'énergie renouvelable ainsi qu'à l'évaluation économique et environnementale des solutions de refroidissement urbain. Le module introduit les principes fondamentaux de fonctionnement des réseaux de froid et explique comment le refroidissement peut être produit, distribué, stocké et intégré dans des infrastructures plus larges de chauffage et de climatisation urbaine.

L'objectif principal de ce document écrit est de fournir une compréhension complète des systèmes de refroidissement urbain, y compris la production combinée de chaleur et de froid, l'utilisation de la chaleur fatale et les applications d'énergie renouvelable. De plus, le module vise à illustrer la mise en œuvre pratique des infrastructures de chauffage et de climatisation urbaines à travers des exemples de projets réalisés.

Le module examine la production conjointe de chaleur et de froid, l'évaluation technique des efficacités thermiques, le fonctionnement des refroidisseurs et des machines à réfrigération par absorption, le rôle des pompes à chaleur, la pertinence environnementale des fluides frigorigènes et la faisabilité du refroidissement urbain et climatique dans différents contextes urbains et climatiques. Il introduit également des stratégies d'optimisation pour améliorer les performances du système tout en réduisant les coûts économiques et environnementaux.

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

Les étudiants et les professionnels peuvent également utiliser le module pour des études indépendantes, surtout s'ils possèdent déjà des connaissances de base en thermodynamique, transfert de chaleur, systèmes CVC, cycles de réfrigération, pompes à chaleur, refroidisseurs, chauffage urbain et systèmes énergétiques pour bâtiments.

Principaux sujets abordés dans le module

- Systèmes de refroidissement urbain et leur rôle dans les réseaux énergétiques modernes urbains
- Principes de chauffage et de climatisation
- Production combinée de chaleur et froid et applications de chauffage et refroidissement simultanés
- Technologies de pompes à chaleur et de refroidisseurs
- Intégration de pompes à chaleur, de refroidisseurs et de sources d'énergie renouvelable dans les réseaux de refroidissement urbain
- Utilisation de la chaleur fatale et intégration de la chaleur renouvelable
- Technologies de production à froid, y compris les refroidisseurs refroidis par air et refroidis par eau
- Machines de réfrigération par absorption
- Stockage d'énergie thermique pour le refroidissement urbain
- Combinaison de systèmes de refroidissement entraînés mécaniquement et thermiquement
- Fluides frigorigènes, leur classification, désignation, sécurité et impact environnemental
- Fluides frigorigènes naturels et à faible PRG

- Évaluation de la densité de demande de refroidissement et de la faisabilité
- Aspects économiques et environnementaux du refroidissement urbain
- Viabilité du refroidissement urbain par rapport aux technologies de refroidissement conventionnelles
- Optimisation des technologies de refroidissement urbain
- Études de cas réalisées sur le refroidissement urbain et le chauffage et la climatisation urbaine
- Mise en œuvre pratique des systèmes de refroidissement urbain dans différents contextes climatiques et urbains

Résultats d'apprentissage du module 4

Le module est conçu pour soutenir le développement des compétences et aptitudes suivantes. À l'issue de ce module, les apprenants devraient être en mesure de :

- comprendre les principes et technologies thermodynamiques sous-jacents aux systèmes de refroidissement urbain ;
- expliquer les principes fondamentaux de fonctionnement des réseaux de refroidissement urbain ;
- analyser les processus de production combinée de chaleur et de froid et calculer leur efficacité opérationnelle ;
- distinguer entre différentes technologies de production de froid, y compris les refroidisseurs refroidis par air, refroidisseurs à eau et machines de réfrigération à absorption ;
- évaluer et justifier l'intégration optimale des pompes à chaleur, refroidisseurs, stockage d'énergie thermique et sources d'énergie renouvelable dans les réseaux de froid urbain ;
- évaluer l'impact environnemental lié à l'utilisation de divers fluides frigorigènes et technologies de refroidissement ;
- comparer les fluides frigorigènes du point de vue de la sécurité, des performances, du PRG et de l'impact environnemental ;
- évaluer la faisabilité économique des systèmes de refroidissement urbain en fonction de la densité de demande de refroidissement, des coûts d'investissement, des coûts opérationnels et des performances à long terme du système ;
- comparer les solutions de refroidissement urbain avec les technologies de refroidissement conventionnelles sous un angle technique, économique et environnemental ;
- interpréter les études de cas réalisées sur le refroidissement urbain et le chauffage et la climatisation urbaine et identifier les principaux facteurs influençant leur faisabilité et leur transférabilité ;
- Appliquer des stratégies d'optimisation pour améliorer la performance du système tout en réduisant simultanément les coûts économiques et environnementaux.

Charge de travail estimée

Ce module représente environ 7,9 heures d'apprentissage, incluant des cours magistraux, des applications pratiques, des études de cas, des études indépendantes et des évaluations.

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

- une unité d'enseignement complète,
- un ensemble de documents de cours sélectionnés,
- un composant d'apprentissage hybride,
- un ensemble pratique de calcul et de simulation,
- un ensemble d'étude de cas et de discussion,
- ou une ressource complémentaire pour les cours existants.

Activités et heures d'apprentissage

Type d'activité	Répartition du temps	Description
Cours magistraux / Assimilation théorique	3 h	Couverture approfondie des principes, technologies et applications du refroidissement urbain à travers des cours et des supports d'apprentissage guidés
Application pratique	1 h	Exercices comprenant des tâches de conception système, des calculs techniques, des simulations de performance et la comparaison des configurations de refroidissement ou de pompes à chaleur
Analyse de cas	0,5 h	Revue critique des projets réels de refroidissement urbain, en tenant compte de leur conception technique et de leur adaptation à différentes conditions climatiques, urbaines et opérationnelles
Recherche indépendante / Auto-apprentissage	3 h	Lecture autonome, révision de la littérature spécialisée, révision des supports d'apprentissage et préparation aux tâches d'évaluation
Évaluation	0,4 h	Quiz d'auto-évaluation au niveau des modules, questions sélectionnées de la banque de questions, rapport technique, présentation de projet ou activité d'évaluation finale
Total des heures d'apprentissage	environ 7,9 h	

Groupes cibles

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

Les principaux groupes cibles sont :

- des enseignants d'enseignement supérieur en ingénierie, services du bâtiment, systèmes énergétiques, chauffage et climatisation urbains, CVC et réfrigération ;
- des formateurs impliqués dans la formation professionnelle ou continue sur les systèmes de chauffage et de climatisation urbains ;
- les enseignants développant des activités d'apprentissage mixtes, modulaires ou axées sur la pratique ;
- le personnel enseignant à la recherche de ressources pédagogiques réutilisables sur les systèmes énergétiques durables des réseaux ;
- Formateurs et enseignants travaillant sur des sujets liés aux réseaux de froid, aux pompes à chaleur, aux refroidisseurs, aux fluides frigorigènes, au stockage d'énergie thermique, aux infrastructures énergétiques urbaines et à l'efficacité énergétique.

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

Utilisation recommandée par les éducateurs et les formateurs

Le module 4 peut être utilisé de manière flexible comme unité pédagogique complète ou comme un ensemble de ressources pédagogiques sélectionnées. Les enseignants peuvent combiner les supports selon le niveau du cours, le temps d'enseignement disponible et les résultats d'apprentissage souhaités.

Besoins pédagogiques	Ressource suggérée pour le module 4
Introduction du sujet	Utiliser l'aperçu du module et les diapositives introductives pour présenter la pertinence du refroidissement urbain, la production combinée de chaleur et de froid, ainsi que le rôle du refroidissement dans les systèmes énergétiques urbains modernes.
Préparer les apprenants avant le cours	Assigner certaines sections du guide comme prélecture pour les activités en classe inversée ou hybride.
Conférences ou séminaires de soutien	Utiliser les diapositives principales de la présentation pour expliquer les principes du refroidissement urbain, le chauffage et refroidissement simultanés, les refroidisseurs, la réfrigération par absorption, les fluides frigorigènes, le stockage d'énergie thermique, les aspects économiques et environnementaux, ainsi que des études de cas sélectionnées.
Prolongement de la discussion des études de cas	Utiliser les diapositives d'étude de cas étendues pour présenter des projets supplémentaires réalisés de refroidissement urbain et de chauffage et refroidissement urbain dans différents contextes.
Vérification de la compréhension	Utiliser des questions sélectionnées de la banque de questions pour discuter, faire de courtes vérifications en classe, faire des évaluations formatives ou des quiz basés sur le LMS.
Développement des compétences en ingénierie appliquée	Utiliser l'exercice pratique pour des travaux basés sur le calcul ou la simulation sur le refroidissement et la performance des pompes à chaleur, la comparaison des fluides frigorigènes, l'analyse COP/EER et l'impact environnemental.
Soutien à l'évaluation environnementale	Utiliser les sections et exercices liés aux fluides frigorigènes pour discuter du PRG, des fluides frigorigènes à faible PRG, des fluides frigorigènes naturels et des implications environnementales du choix des fluides frigorigènes.
Soutien de l'analyse économique et de faisabilité	Utiliser les sections d'évaluation économique et environnementale pour discuter de la densité de demande de refroidissement, des coûts d'investissement, des coûts opérationnels, des considérations tarifaires et de la viabilité à long terme.
Soutien au travail d'étude de cas	Utiliser les exemples de projets réalisés pour comparer comment les solutions de refroidissement urbain sont adaptées à différents contextes climatiques, urbains, techniques et économiques.
Soutien à la révision indépendante	Diriger les apprenants vers le quiz d'auto-évaluation au niveau du module après avoir étudié les contenus pertinents.
Adaptation aux contextes pédagogiques locaux	Sélectionner, combiner ou modifier les sections du guide, les diapositives, les questions, les exercices pratiques et les supports d'étude de cas selon le programme, le niveau du participant et le contexte professionnel.

Parcours recommandé pour les apprenants indépendants

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

Etapes	Activité suggérée
Réviser la présentation introductive	Familiarisez-vous avec les concepts principaux, la terminologie et la structure du module.
Étudier les documents du guide	Lire les explications détaillées, les principes d'ingénierie et les concepts de refroidissement urbain présentés dans le guide.
Consulter les sections sur la production combinée de chaleur et de froid	Comprendre comment le chauffage et la climatisation simultanés peuvent améliorer l'efficacité énergétique et soutenir l'intégration des systèmes énergétiques urbains
Étudier les technologies de production à froid	Comparer les refroidisseurs, les machines à réfrigération à absorption et les solutions de stockage d'énergie thermique.
Examiner les sections « fluide frigorigène »	Étudier la classification des fluides frigorigènes, le développement historique, la désignation de sécurité, l'impact environnemental et les tendances futures en matière de fluides frigorigènes.
Examiner les aspects économiques et environnementaux	Analyser le rôle de la densité de demande de refroidissement, la faisabilité, les coûts d'investissement, la performance environnementale et l'optimisation.
Regarder la vidéo du module	Utiliser la vidéo du module et ses questions d'évaluation jointes pour explorer un sujet, un concept ou un aspect pratique du module sélectionné.
Compléter le quiz d'auto-vérification	Tester votre compréhension des concepts clés et des principes techniques abordés dans le module.
Tenter l'exercice pratique	Appliquer les connaissances acquises en analysant les performances du refroidissement et des pompes à chaleur, la comparaison des fluides frigorigènes et l'impact environnemental.
Examiner les études de cas	Comparer les projets réalisés de refroidissement urbain et de chauffage et refroidissement urbain et réfléchir à leur transférabilité à d'autres contextes.
Consulter la banque de questions	Utiliser les questions pour réviser, discuter ou préparer l'évaluation.

Supports disponibles

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

- diapositives de présentation sur les sujets des modules ;
- diapositives d'étude de cas étendues présentant d'autres projets réalisés de refroidissement urbain et de chauffage et refroidissement urbain ;
- une banque de questions réutilisable et une clé de réponses ;
- un quiz d'auto-évaluation au niveau du module ;
- une vidéo du module avec des questions d'évaluation jointes ;
- un exercice pratique basé sur la simulation de refroidissement et de pompe à chaleur, la comparaison des fluides frigorigènes, l'analyse COP/EER et l'évaluation de l'impact environnemental, incluant des solutions suggérées ;
- une activité d'étude de cas basée sur des projets réalisés de refroidissement urbain et de chauffage et climatisation urbains.

Table des matières

Refroidissement urbain 11
1.1. Principes de chauffage et de climatisation 11
1.1.1. Refroidissement 11
1.1.2. Pompes à chaleur 12
1.2. Applications simultanées de chauffage et de refroidissement 13
1.2.1. Principe de chauffage et refroidissement simultanés (SHC) 13
1.2.2. Composants clés du chauffage et refroidissement simultanés (SHC). 14
1.2.3. Avantages du SHC 15
1.2.4. Défis du SHC 15
1.2.5. Applications du SHC dans les réseaux RCF 15
1.3. Technologies de pompes à chaleur et de refroidisseurs connexion aux RCF 16
1.3.1. Remarques sur les technologies de pompes à chaleur 16
1.3.2. Technologies émergentes et tendances futures 16
1.4. Technologies de pompes à chaleur et de refroidisseurs connexion aux RCF 17
1.4.1. Compresseurs 17
1.4.2. Échange thermique 18
1.4.3. Stockage d'énergie thermique 18
1.5. Intégration des pompes à chaleur, des configurations et des fluides frigorigènes 19
1.5.1. Possibilités d'intégration 19
1.5.2. Influence des températures opérationnelles 20
1.6. Déchets et chaleur renouvelable 21
1.7. Déchets et chaleur renouvelable 22
2. Technologies de production de froid 23
2.1. Refroidisseurs 23
2.1.1. Types de refroidisseurs 24
2.1.2. Indicateurs clés et efficacité 26
2.1.3. Ratio d'efficacité énergétique saisonnière (SEER) 26
2.2. Machines de réfrigération à absorption 27
2.2.1. Type de refroidisseurs 27
2.2.2. Refroidisseurs à absorption de vapeur 27
2.2.3. Réfrigération par absorption 27
2.2.4. Types de systèmes de réfrigération à absorption 29
2.3. Stockage d'énergie thermique (TES) 31

2.3.1. Principal avantage de TES 31
2.3.2. Type de TES (Tableau 3) 32
2.4. Combinaison de systèmes mécaniques et d'absorption à énergie thermique. 35
2.5. Conclusions 37
3. Fluides frigorigènes 37
3.1. Introduction 37
3.2. Histoire et évolution 41
3.3. Désignation et propriétés 42
3.4. Résumé des métriques environnementales (Fig. 23) 46
3.5. Avenir des fluides frigorigènes 53
3.6. Conclusions 54
4. Aspects économiques et environnementaux 54
4.1. Introduction 54
4.2. Densité de la demande 55
4.3. Viabilité du refroidissement urbain par rapport à d'autres technologies 57
4.4. Impact environnemental du refroidissement urbain 61
4.5. Optimisation des technologies de refroidissement urbain 63
4.6. Conclusions 65
5. Études de cas sur les projets réalisés 65
5.1. RFU Université James Cook (Townsville, Australie) [38] 65
5.2. Quartier de La Pinada 67
5.3. Extension du réseau RCF Bristol Redcliff 69
5.4. RCF Parc de l'Alba 71
5.5. RCF Barcelone (Espagne) 72
5.6. RCF Grand Stockholm 74
5.7. Récupération de l'énergie froide RFU issue de la vaporisation de gaz naturel liquéfié 77
5.8. RFU Ville de Stockholm 80
5.9. RFU combiné avec des électrolyseurs à hydrogène 81
5.10. RFU pour les complexes hôteliers 83
5.11. Conclusions 84
Références 86

Refroidissement urbain

1.1. Principes de chauffage et de climatisation

Introduction

Le chauffage et la climatisation sont essentiels pour le confort en hiver et en été. Le chauffage est également nécessaire dans les bâtiments pour les services d'eau chaude, généralement à des températures différentes. Cependant, les plus grands consommateurs de chauffage et de climatisation se trouvent dans l'industrie, et cette dernière aussi pour la transformation alimentaire, le stockage et le transport. Les exigences de température pour le chauffage et le refroidissement varient selon les applications ; le refroidissement peut aller de -150 °C et le chauffage jusqu'à 1000 °C. Les procédés de refroidissement sont principalement basés sur des systèmes de compression de vapeur, également appelés refroidisseurs, lorsqu'ils produisent de l'eau de refroidissement autour de 10 °C. La production de chauffage repose sur des pompes à chaleur, un concept similaire à celui des refroidisseurs. Cependant, à des températures plus élevées ou selon l'application, elle repose toujours sur des chaudières à combustibles fossiles, qui seront progressivement remplacées par des procédés renouvelables [1].

Des aspects techniques tels que la durabilité, la facilité d'entretien, la simplicité, le volume et la sécurité sont essentiels dans le chauffage et la climatisation. Cependant, chaque jour est plus crucial pour l'efficacité du système, car cela aura un impact sur les coûts et l'environnement. Les technologies traditionnelles de chauffage et de climatisation peuvent être combinées avec le chauffage et les réseaux de refroidissement urbain (Fig. 1) pour améliorer de plusieurs façons l'efficacité et le profit économique. Les réseaux de chauffage urbain peuvent être utilisés comme transporteurs de chaleur pour le chauffage produit dans les centrales ou les centrales de production de chauffage distribuée. Il en va de même pour les réseaux de refroidissement urbain et les refroidisseurs. De plus, les réseaux de chauffage et de refroidissement urbains peuvent créer des conditions opérationnelles favorables pour permettre aux pompes à chaleur et refroidisseurs de produire un chauffage et un refroidissement plus efficaces. Ils peuvent également être utilisés pour préchauffer ou pré-refroidir le dissipateur ou la source.

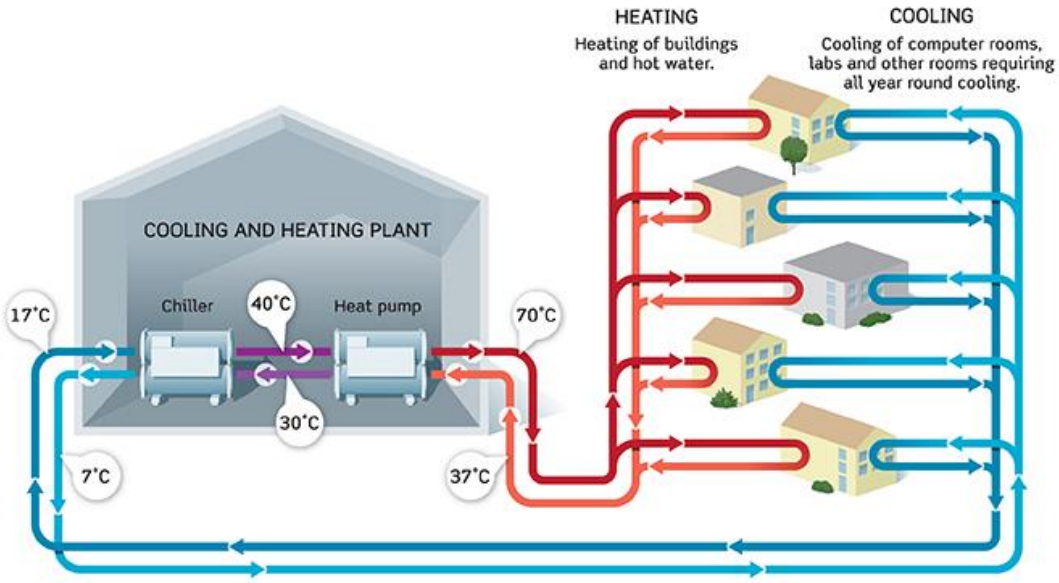


Fig. 1. Connexions entre RFU et RCU [2].

1.1.1. Refroidissement

Le refroidissement consiste à retirer la chaleur d'une substance ou d'un espace pour en abaisser la température. Il est essentiel pour le confort thermique, la préservation des matériaux et les applications industrielles. Les procédés de refroidissement comprennent :

1. **Extraction thermique.**

La chaleur est retirée d'un système par conduction, convection ou rayonnement. Généralement obtenue en transférant la chaleur à un fluide plus froid (par exemple, de l'air ou de l'eau).

2. **Évaporation.**

Utilise la chaleur latente de vaporisation, où l'énergie thermique est absorbée pour convertir un liquide en vapeur. Largement appliqué dans les systèmes de refroidissement par évaporation et les cycles de réfrigération.

3. **Cycles de réfrigération**

Basé sur des systèmes de compression de vapeur, il nécessite principalement une entrée électrique. Haute performance. Limite maximale par le cycle de Carnot inversé.

Chauffage

Le chauffage fournit de la chaleur à partir d'une substance ou d'un espace pour augmenter sa température. Il est essentiel pour le confort thermique, les procédés industriels et le chauffage de l'eau. Les procédés de chauffage incluent :

1. **Extraction thermique**

La chaleur est fournie à un système par conduction, convection ou rayonnement. Obtenue couramment en transférant la chaleur à un fluide plus froid (par exemple, air ou eau). Peut inclure de la chaleur renouvelable, des panneaux solaires thermiques, des chaudières, une récupération de chaleur fatale...

2. **Condensation**

Utilise la chaleur latente de la vaporisation, où l'énergie thermique est absorbée pour convertir la vapeur en liquide.

3. **Pompe à chaleur**

Basé sur des systèmes de compression de vapeur, il nécessite principalement une entrée électrique et présente de hautes performances.

Comme on peut le voir, les processus sont similaires au refroidissement mais dans le sens inverse. Par conséquent, l'étude du refroidissement peut aider à comprendre le chauffage, et inversement.

1.1.2. Pompes à chaleur

Outre la chaleur fatale ou la chaleur renouvelable, qui peuvent être injectées dans les réseaux de chauffage urbain à faible coût d'exploitation, la plupart du chauffage est assuré par des chaudières (qui peuvent être considérées comme renouvelables si la biomasse, le biogaz, etc., sont utilisés) ou des pompes à chaleur.

Les pompes à chaleur, principalement basées sur des systèmes de compression de vapeur, peuvent fonctionner pour le chauffage, le refroidissement, ou les deux (Fig. 2). Cela dépend principalement de la cible du procédé thermique envisagée, mais les pompes à chaleur génèrent toujours un chauffage et un refroidissement simultanés. Une fois l'installation dimensionnée, la production de froid et de

chaud dépend de la fréquence du compresseur, qui peut être contrôlée par un inverter selon le besoin principal.

Si la pompe à chaleur (terme utilisé pour le chauffage) peut fonctionner en mode chauffage ou climatisation, on parle de pompe à chaleur réversible..

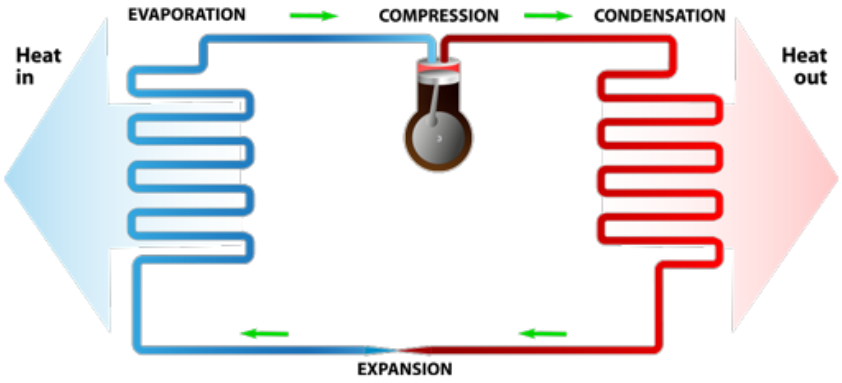


Fig. 2. Système de compression de vapeur (pompe à chaleur) [3].

1.2. Applications simultanées de chauffage et de refroidissement

1.2.1. Principe de chauffage et refroidissement simultanés (SHC)

Le chauffage et la climatisation simultanés sont principalement produits dans les pompes à chaleur (Fig. 3), la technologie la plus courante pour le refroidissement et le chauffage en dessous de 100 °C. Le chauffage et la climatisation simultanés ne sont généralement pas envisagés dans les petits systèmes, car il existe de nombreux défis pour être rentable. Les réseaux de chauffage et de refroidissement urbains sont bénéfiques pour transporter l'excédent de chauffage ou de refroidissement non utilisé dans la même centrale où le chauffage ou le refroidissement primaire est produit, ce qui apporte un profit économique supplémentaire au propriétaire de la centrale et réduit la consommation énergétique globale. Les réseaux de chauffage et de refroidissement urbains évitent la nécessité de stockage d'énergie thermique ou peuvent même être combinés.

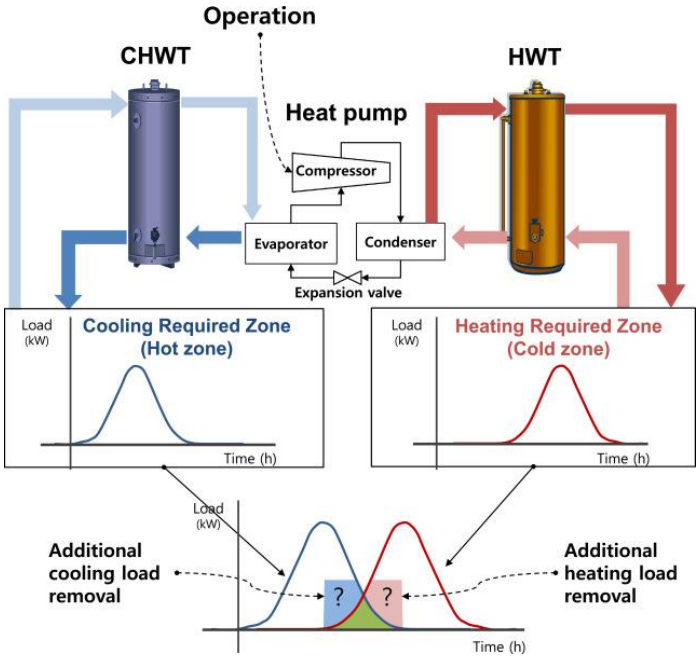


Fig. 3. Pompe à chaleur simultanée chauffant et refroidissement [4].

Par exemple, les systèmes de réfrigération des supermarchés (Fig. 4) peuvent utiliser la chaleur dans un refroidisseur à gaz ou un condenseur, qui est généralement dissipée dans l'air et injectée dans un réseau de chauffage urbain.

La figure montre un exemple où le système central de compression de vapeur (à droite) est utilisé pour les réfrigérateurs et congélateurs, et le chauffage à la sortie du compresseur est produit pour le chauffage des pièces. La chaleur restante est dissipée, mais avec un système de contrôle approprié, elle peut aussi être injectée dans le RCU ou stockée.

Le système auxiliaire (à gauche) injecte de la chaleur dans le réseau de chauffage urbain et utilise le refroidissement pour sous-refroidir mécaniquement le système central (afin d'améliorer la performance énergétique).

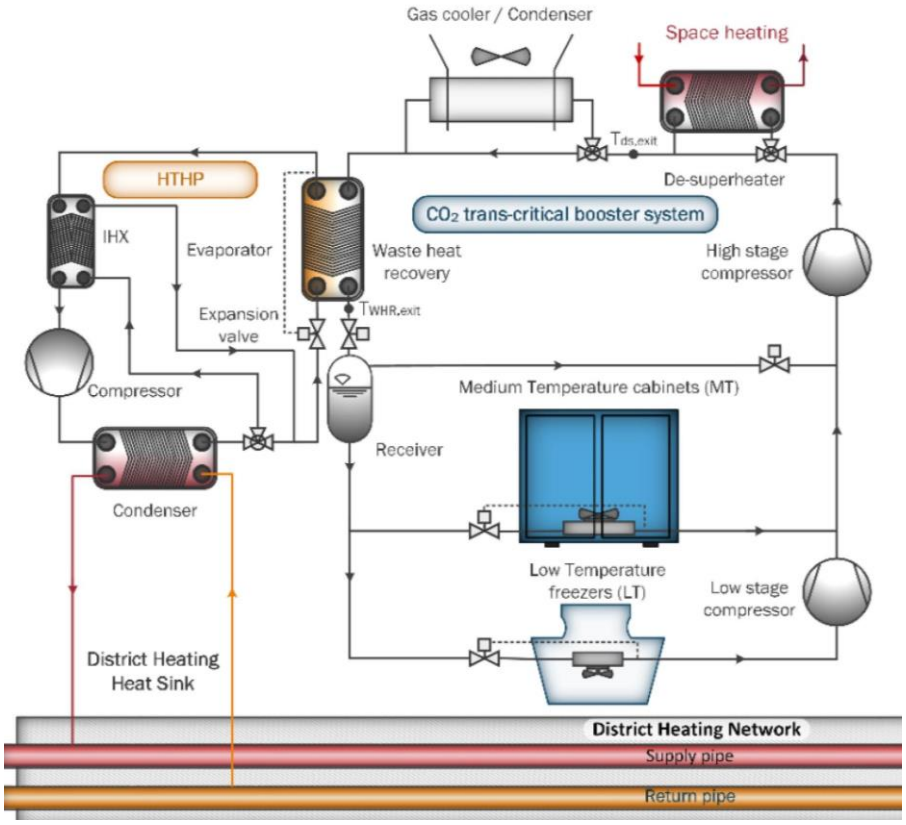


Fig. 4. Systèmes de réfrigération simultanés de supermarché pour le chauffage et la climatisation [5].

1.2.2. Composants clés du chauffage et refroidissement simultanés (SHC)

Dans les systèmes RCF, l'énergie est transportée vers les bâtiments via un réseau de tuyaux isolés transportant de l'eau chaude, de la vapeur, de l'eau froide ou des fluides frigorigènes. Cependant, les composants clés suivants peuvent être envisagés pour diversifier les options et étendre les possibilités d'utilisation de l'énergie.

1. Pompes à chaleur/refroidisseurs. Les pompes à chaleur sont centrales dans les systèmes SHC, car elles peuvent simultanément extraire la chaleur d'un processus de refroidissement et la transférer à un système de chauffage, agissant ainsi comme un pont entre les besoins en chauffage et en refroidissement. Elles utilisent des cycles de compression ou d'absorption de vapeur pour déplacer l'énergie entre les dissipateurs et les sources.

2. Réseau de distribution d'énergie thermique. Les pipelines isolés transportent l'énergie de chauffage et de refroidissement vers et depuis les bâtiments. Des contrôles avancés garantissent une distribution efficace basée sur la demande en temps réel.
3. Systèmes de récupération d'énergie. Les échangeurs de chaleur captent et transfèrent la chaleur fatale (chaleur gratuite) d'un côté du système (charge de refroidissement) à un autre (charge de chauffage) afin de satisfaire les besoins en chauffage. Par exemple, la chaleur rejetée par les refroidisseurs ou les systèmes de climatisation pendant le refroidissement peut être captée et réutilisée pour le chauffage.
4. Chauffage et Énergie combinés (CHP). Les unités de cogénération peuvent être intégrées aux systèmes RCF pour produire de l'électricité et produire de la chaleur, améliorant ainsi l'efficacité du système.
5. Stockage d'énergie thermique (TES). Les systèmes TES (par exemple, les réservoirs d'eau chaude ou les réservoirs d'eau froide) sont souvent intégrés pour stocker l'excès d'énergie thermique lors des périodes de faible demande, assurant ainsi un fonctionnement efficace aux heures de pointe.

1.2.3. Avantages du SHC

1. Efficacité énergétique : En récupérant et réutilisant la chaleur fatale, les systèmes SHC réduisent considérablement la consommation d'énergie par rapport aux systèmes de chauffage et de refroidissement séparés.
2. Empreinte carbone réduite : Utiliser la chaleur fatale minimise la dépendance aux combustibles fossiles, diminuant ainsi les émissions de gaz à effet de serre.
3. Économies : Le partage des infrastructures de chauffage et de climatisation réduit les coûts de capital et d'exploitation du réseau.
4. Flexibilité : Les systèmes SHC sont adaptables aux besoins variables de chauffage et de climatisation, ce qui les rend idéaux pour les développements à usage mixte (par exemple, zones résidentielles, commerciales et industrielles).
5. Gestion des charges de pointe : Les systèmes SHC atténuent les pics de demande énergétique en répondant simultanément aux besoins de chauffage et de refroidissement.

1.2.4. Défis du SHC

1. Investissement initial : coûts initiaux élevés pour les infrastructures et les systèmes de pompes à chaleur.
2. Conception de systèmes complexes : nécessite une ingénierie et un ajustement précis pour équilibrer simultanément les charges de chauffage et de refroidissement.
3. Stockage d'énergie : Des systèmes TES efficaces sont essentiels pour gérer les besoins incompatibles en chauffage et en climatisation au fil du temps.
4. Intégration avec les énergies renouvelables : Coupler les systèmes SHC avec des sources d'énergie renouvelable (par exemple, solaire, thermique ou géothermique) peut améliorer l'impact environnemental mais nécessite une planification minutieuse.
5. Contrôle : Le chauffage et la climatisation doivent toujours être consommés, transportés, stockés ou dissipés afin d'assurer un contrôle adéquat des températures.

1.2.5. Applications du SHC dans les réseaux RCF

Parfaitement conçu pour les réseaux RCF, mais il peut aussi s'intégrer aux réseaux RCU et RFU traditionnels. En particulier :

1. Développements urbains à usage mixte : Les immeubles résidentiels, commerciaux et de bureaux avec des besoins thermiques variables peuvent être desservis efficacement.

2. Parcs industriels : Les industries ayant des besoins élevés en refroidissement (par exemple, les centres de données) peuvent fournir de la chaleur aux processus ou aux communautés voisines.
3. Complexes hospitaliers : Les hôpitaux nécessitent un chauffage simultané pour la stérilisation et le refroidissement afin de garantir le confort du patient, ce qui rend le SHC très pertinent.
4. Campus universitaires : Les grands campus avec des besoins thermiques variés peuvent optimiser leur consommation d'énergie grâce à des systèmes centralisés de systèmes SHC.

Avenir :

1. Système hybride
2. Intégration des sources renouvelables et des technologies avancées de pompes à chaleur.
3. Numérisation : Utilisation des réseaux intelligents et de l'IoT pour optimiser la distribution de l'énergie thermique.
4. Énergie circulaire : Accent accru sur la récupération de la chaleur fatale provenant de diverses sources telles que les centres de données et les procédés industriels.

1.3. Technologies de pompes à chaleur et de refroidisseurs connexion aux RCF

1.3.1. Remarques sur les technologies de pompes à chaleur

Au lieu de dissiper ou d'absorber la chaleur dans l'eau ambiante, souterraine, de mer, de l'eau connectée à une tour de refroidissement, etc., elle peut être connectée au réseau thermique.

La plupart des cas concernent des pompes à chaleur à source d'eau ou des refroidisseurs refroidis par eau, mais la chaleur peut aussi être transférée à l'air sous forme de fluide de transfert de chaleur ou stockée dans le sol.

Les pompes à chaleur à compression de vapeur sont actuellement les systèmes les plus efficaces, avec des coefficients de performance (COP) allant de 3 à 6. En revanche, les systèmes d'absorption ont des COP plus faibles, généralement entre 0,5 et 1,5, mais ils peuvent fonctionner de manière économique lorsqu'ils sont alimentés par la chaleur fatale ou des sources thermiques renouvelables, nécessitant de l'électricité uniquement pour les composants auxiliaires. Les systèmes hybrides restent en grande partie à des stades de développement précoce, principalement limités à des projets de recherche ou à des études de cas. Par ailleurs, les technologies caloriques sont encore à plusieurs décennies de la commercialisation, mais elles ont un potentiel à long terme car elles ne dépendent pas des fluides frigorigènes, ce qui élimine les fuites et réduit les besoins d'entretien.

1.3.2. Technologies émergentes et tendances futures

1. **Fluides frigorigènes** naturels :

    a) Utilisation croissante de fluides frigorigènes comme l'ammoniac (NH_3), le dioxyde de carbone (CO_2) et les hydrocarbures (par exemple, propane, isobutane) en raison de leur faible potentiel de réchauffement climatique et de leur absence de potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone.

    b) Les défis liés à l'inflammabilité (hydrocarbures) et aux pressions de fonctionnement élevées (CO_2).

2. **Pompes à chaleur à haute température** :

    a) Capable de fournir de la chaleur à des températures supérieures à 100 °C, adaptée aux applications industrielles et à l'intégration dans le RCU.

    b) Utiliser des fluides de travail avancés comme R-1234ze(E) ou R-1336mzz(Z) pour une meilleure stabilité thermique

3. **Numérisation et IoT :**

   a) Pompes à chaleur et refroidisseurs intelligents équipés de capteurs et de connectivité IoT pour la surveillance en temps réel des performances, la détection des pannes et la maintenance prédictive.

Algorithmes avancés pour la gestion de la demande et l'écrêtement des pointes de consommation.

4. **Refroidissement thermoélectrique et magnétocalorique** :

   a) Pompes à chaleur thermoélectriques : Utiliser l'effet Peltier pour obtenir un refroidissement ou un chauffage sans pièces mobiles.

   b) Refroidissement magnétocalorique : Exploite les matériaux magnétocaloriques pour fournir un refroidissement sans fluides frigorigènes.

   c) Défis liés à une mise à l'échelle limitée et des coûts élevés.

5. **Systèmes hybrides** :

   a) Intégration des pompes à chaleur et des refroidisseurs avec des sources d'énergie renouvelable (par exemple, solaire, thermique, géothermique).

   b) L'utilisation du stockage d'énergie thermique pour optimiser la gestion de la charge.

6. **Intégration avec les systèmes énergétiques urbains :**

   a) Réseaux de chauffage et de refroidissement urbains pour des applications simultanées de chauffage et de refroidissement avec pompes à chaleur, refroidisseurs et systèmes de récupération d'énergie pour une efficacité accrue.

1.4. Technologies de pompes à chaleur et de refroidisseurs connexion aux RCF

1.4.1. Compresseurs

La technologie des refroidisseurs et pompes à chaleur dépend du type de compresseurs, principalement choisis en fonction de l'application, de la capacité de chauffage ou de refroidissement (Fig. 5), et de la différence de température entre le dissipateur thermique et la source (rapport de pression).

Cela influence le choix du fluide frigorigène, la taille de l'installation, le coût, le contrôle et d'autres composants de sécurité ou auxiliaires. Selon la dimension ou l'optimisation, les compresseurs peuvent également être connectés en parallèle. Le refroidisseur porte son nom en fonction du type de compresseur et de la dissipation ou de l'absorption de chaleur avec l'ambiance (refroidi par air ou refroidi par eau).

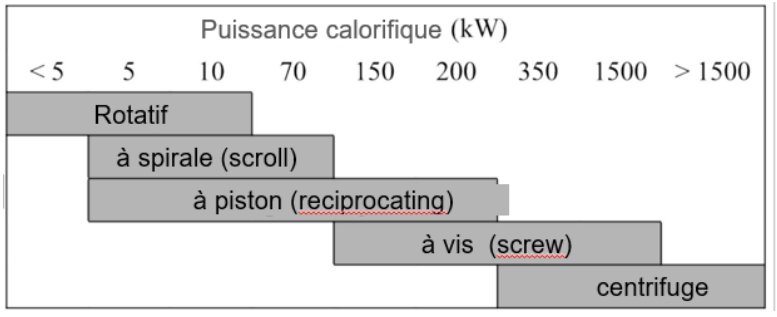


Fig. 5. Type de compresseur en fonction de la plage de capacité de chauffage [6].

- **Compresseurs avancés**

Selon le type de compresseur, les refroidisseurs avancés et à haute capacité peuvent également être nommés :

1. Refroidisseurs magnétiques à roulements :

a) Utiliser des roulements magnétiques pour le compresseur, réduisant ainsi la friction mécanique.

b) Avantages : Haute efficacité, faible bruit et maintenance réduite.

c) Limitations : coût initial élevé.

2. Refroidisseurs centrifuges :

a) Utiliser un compresseur centrifuge pour faire circuler les fluides frigorigènes.

b) Avantages : Capacité élevée et efficacité pour des applications à grande échelle.

c) Limitations : Pas idéal pour les systèmes plus petits en raison des coûts élevés.

1.4.2. Échange thermique

La plupart des échanges de chaleur entre pompes à chaleur et refroidisseurs ainsi qu'entre RFU et RCU sont basés sur des échangeurs de chaleur. Il existe différents types de technologies, selon différentes classifications comme indiqué à la section 3.5.3.1. Les échangeurs de chaleur les plus courants sont de type tube-calandre, utilisés dans les procédés pétrochimiques, microcanaux, utilisés pour la climatisation mobile, ou échangeurs de chaleur refroidis par air, pour la dissipation de l'air dans les condenseurs. Comme il est plus efficace, l'échange thermique est convectif ou plus changement de phase. Cependant, il peut être basé sur la convection naturelle, comme les congélateurs domestiques ou les réfrigérateurs. La technologie la plus compacte et efficace pour l'échange de chaleur liquide-liquide est l'échange de chaleur à plaques.

Les échangeurs de chaleur à plaques sont les plus courants pour les échangeurs de chaleur eau-eau, les condenseurs et les évaporateurs.

1. **Efficacité du transfert de chaleur** – approche thermique améliorée, écoulement en contre-courant précis, 80-90 % de volume de maintien en moins.
2. **Faible coût** - faible investissement en capital, installation, maintenance limitée et coûts d'exploitation.
3. **Plus grande fiabilité** : moins d'encrassements, de contraintes, d'usure et de corrosion.
4. **Responsable** - consommation d'énergie minimale pour la plupart des effets de procédé, nettoyage réduit.
5. **Capacité facile à augmenter** – plaques réglables sur des cadres existants.

Limitations associées à la haute température, à la pression, à l'étanchéité et au blocage des particules. Cela est traité par une conception et un entretien appropriés.

1.4.3. Stockage d'énergie thermique

Le stockage d'énergie thermique (TES) (Fig. 6) est essentiel pour déplacer la charge maximale lors du chauffage ou du refroidissement. Ils sont également utilisés dans les réseaux où les températures nocturnes ou diurnes peuvent être utilisées pour un refroidissement ou chauffage gratuit, et lorsque la chaleur renouvelable ou fatale est générée à un pic. Les principales technologies TES sont la chaleur sensible, latente (réservoirs d'eau), les matériaux à changement de phase ou stockage de glace, et les TES thermochimiques. TES inclut le stockage de chauffage ou de climatisation. Le principal inconvénient est le volume requis par kWh. Les matériaux pour le changement de phase et le TES

thermochimique en sont à un stade précoce de développement, mais peuvent contribuer à résoudre ce problème.

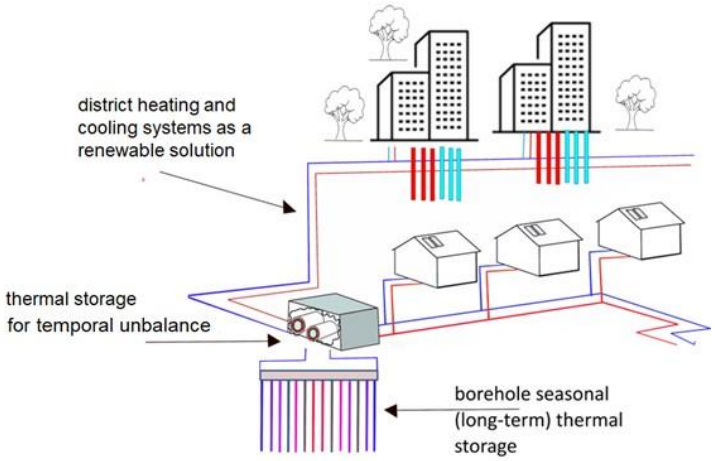


Fig. 6. Connexion TES au RCF [7].

1.5. Intégration des pompes à chaleur, des configurations et des fluides frigorigènes

Les informations d'entrée pour la dimension, la conception ou la sélection de la pompe à chaleur, y compris la configuration et les fluides frigorigènes, seront basées sur ses applications de dissipation ou d'absorption de chaleur. Les questions suivantes sont requises.

1. Quel type de pompe à chaleur sera utilisé ? Pour uniquement des usages thermiques (chauffage/refroidissement), un système hybride avec un système d'absorption, un système hybride avec production d'électricité, ou TES, disponible...
2. Comment la pompe à chaleur sera-t-elle utilisée ? Chauffage, climatisation, les deux simultanément, les deux alternativement...
3. Le réseau thermique est-il utilisé pour soutenir ou recevoir le chauffage/refroidissement ?

   a) RCU basse température pour la connexion à l'évaporateur et la production de chauffage à haute température dans le condenseur

   b) Connexion RFU dans l'évaporateur, bénéfice économique dans l'évaporateur (refroidissement) et condenseur (chauffage haute température)

4. Quel est le procédé ciblé, la température (fixe ou variable) et le milieu de transfert de chaleur ? RCU, RFU, refroidisseur, réfrigération commerciale (basse ou moyenne température), climatisation, chauffage de bâtiments, chauffe-eau, chauffage industriel, etc.

1.5.1. Possibilités d'intégration

Une combinaison de consommation de chauffage et de climatisation urbaine et industrielle par une pompe à chaleur avec possibilité de production simultanée (tableau 1 et Fig. 7).

	Application	Plage de température	Technologie traditionnelle
Source de chaleur	Air ambiant	0-30 °C (15 °C)	Plusieurs technologies
	Centre de refroidissement des données	20-50 °C (35 °C)	Technologies de refroidissement basées sur le R-410A

	Chauffage urbain à basse température	40-70 °C (55 °C)	Technologies de mélange (déchets-con/chauffage, chaudière à gaz, charbon, etc.)
Dissipateur thermique	Chauffage des bâtiments à basse température	45-50 °C	Chaudière solaire, électrique ou à gaz
	Eau chaude domestique	45-65 °C	Chaudière électrique ou à gaz
	Processus industriels/Radiateurs de chauffage	75-90 °C	Système centralisé à combustion au gaz

Tableau 1. Application de pompe à chaleur pour le chauffage et la climatisation simultanés [8].

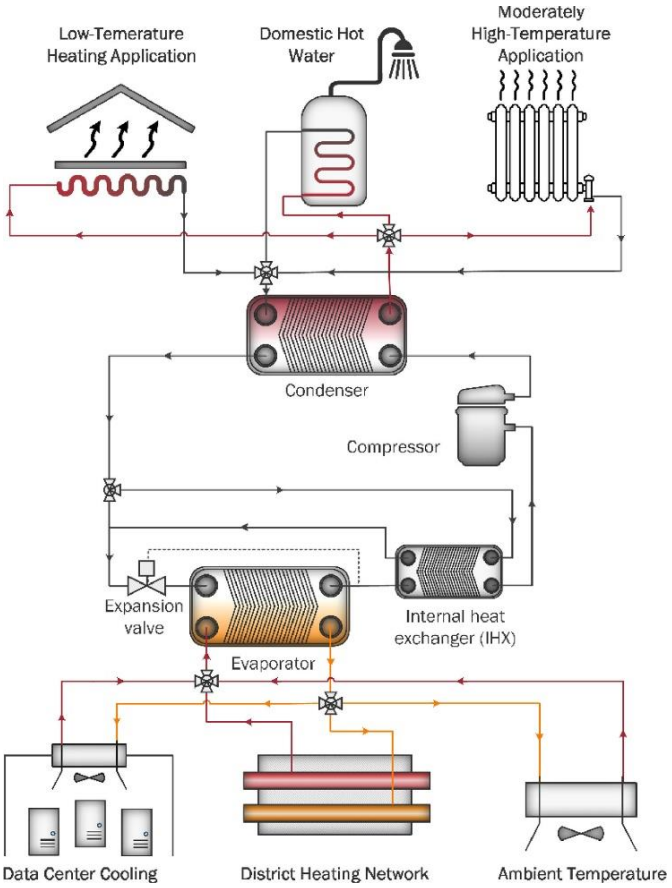


Fig. 7. Application de pompe à chaleur pour le chauffage et le refroidissement simultanés [8].

1.5.2. Influence des températures opérationnelles

Selon la température du dissipateur thermique et de la source de chaleur, le COP variera considérablement (Fig. 8). Le COP représente le kW de chauffage ou de refroidissement par kW d'électricité absorbé. Un COP plus élevé signifie une consommation d'énergie plus faible, des coûts opérationnels plus faibles et des émissions de CO2 plus faibles. (un potentiel de décarbonation plus élevé).

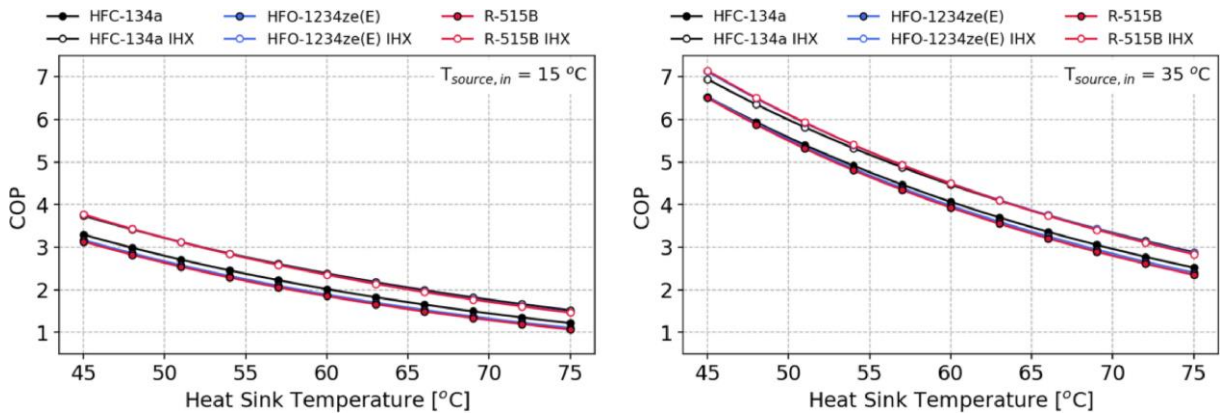


Fig. 8. Évolution du COP en fonction du dissipateur thermique et de la source de chaleur [8].

Combinaison avec RCU, RFU et procédés industriels

Selon la température et la connexion entre RCU et RFU, différentes possibilités peuvent être envisagées pour la pompe à chaleur (pompe à chaleur centrale/locale).

Combinaison avec RCU, RFU et procédés industriels : perspective énergétique

Une différence plus élevée entre le dissipateur thermique et la source de chaleur nécessitera plus d'une étape dans le cycle de compression vapeur de la pompe à chaleur. De plus, l'échangeur de chaleur interne peut améliorer la performance énergétique, selon le fluide frigorigène et l'application.

Combinaison avec RCU, RFU et procédés industriels : perspective économique

Les coûts d'exploitation et d'investissement dépendent largement des applications envisagées, tandis qu'une chaudière à combustibles fossiles est principalement influencée par les besoins en chauffage. Chaque situation doit être étudiée en détail pour déterminer quelle combinaison peut réduire les coûts et rendre l'investissement plus attractif.

Combinaison avec RCU, RFU et procédés industriels : perspective environnementale

Le COP obtenu influence clairement la durabilité de la solution une fois écologique si des fluides frigorigènes sont choisis. Un autre facteur critique est le réseau électrique et le facteur d'émission de carbone (origine de l'électricité produite).

COP combiné

Le COP combiné ou agrégé considère que la sortie de transfert de chaleur de la pompe à chaleur est un refroidissement et un chauffage (quantifiés respectivement par l'EER et le COP). En même temps, l'électricité constitue l'énergie payante à fournir au système.

Comparaison avec les chaudières à combustibles fossiles

L'avantage économique par rapport aux chaudières à combustibles fossiles est important, mais cela dépend des températures de fonctionnement

1.6. Déchets et chaleur renouvelable

Introduction

La chaleur fatale et renouvelable peut être intégrée pour compléter l'absence de refroidissement ou de chauffage de la pompe à chaleur, ou pour aider aux heures de pointe.

Certains éléments de la pompe à chaleur peuvent également être combinés avec des sources de chaleur fatales et renouvelables pour augmenter le COP global. Elle sera mise en œuvre à différents

niveaux selon la disponibilité, la variabilité et la température de la source de chaleur renouvelable ou fatale.

1. Les panneaux solaires thermiques peuvent être connectés à des évaporateurs pour augmenter la température et le COP. Cependant, la température et le panneau thermique seront très variables.
2. La chaleur fatale à basse température peut également être connectée à l'évaporateur. Elle peut être plus constante. La chaleur fatale peut apparaître à de nombreuses températures différentes. L'eau grise peut être une autre source de chaleur précieuse dans les villes intelligentes.
3. Les centres de données nécessitent un refroidissement important à température constante. Cependant, ils peuvent être utilisés pour fixer la température d'évaporation et produire un refroidissement simultanément, avec des avantages énergétiques et économiques significatifs.
4. Un chauffage à haute température peut être relié à des éléments qui se combinent avec les éjecteurs, augmentant ainsi le COP final. Cependant, les éjecteurs ne sont disponibles que pour la réfrigération au CO2 dans les supermarchés, qui en est à un stade intermédiaire de développement.
5. Les pompes à chaleur géothermiques doivent être étudiées en détail pour déterminer les conditions du sol, ce qui peut rendre l'investissement non rentable en termes techniques.

Exemple 1. Une nouvelle pompe à chaleur assistée par un éjecteur utilisant énergie solaire et chaleur fatale pour des usages simultanés de chauffage et de refroidissement. Le système utilise la chaleur fatale provenant de trois sources différentes : PV/T (thermique photovoltaïque) avec collecteur plan, procédé de pasteurisation du lait et chaleur d'échange par condenseur.

Exemple 2. Un nouveau système composé PV/T (thermothermique photovoltaïque) et d'une pompe à chaleur assistée par un éjecteur utilisant de la chaleur fatale pour le refroidissement simultané des centres de données et la récupération de la chaleur fatale pour les réseaux de chauffage urbain. Le système utilise la chaleur fatale PV/T avec un condenseur évaporatif comme force motrice pour un éjecteur tout en exploitant la puissance électrique générée pour faire fonctionner le compresseur et les pompes à pompe à chaleur.

Exemple 3. Système combiné à cycle de Rankine organique et à compression de vapeur à éjecteur composé et multi-évaporateurs pour deux niveaux de refroidissement et de chauffage avec génération d'électricité, et utilisation de la chaleur géothermique et de la chaleur fatale du condenseur. Le système est envisagé selon deux modes : électricité-refroidissement avec valorisation de la chaleur fatale du condenseur, et électricité-chauffage.

Exemple 4. Un système combiné ORC (cycle de Rankine organique) et VCC (cycle à compression de vapeur) à éjecteur, alimenté par la chaleur résiduelle de serres, est proposé pour une production écoénergétique d'électricité, de froid et de chaud. Le système fonctionne sur une large plage de sources géothermiques. Il utilise la chaleur fatale de deux sources distinctes pour répondre simultanément à plusieurs besoins : le refroidissement, le chauffage et la génération d'électricité. Il dispose pour cela de trois modes de fonctionnement : électricité-refroidissement, électricité-pompe à chaleur, ou électricité-géothermie. Une source souterraine associée est également couplée au système pour soutenir le cycle ORC.

1.7. Déchets et chaleur renouvelable

1. Le chauffage et la climatisation simultanés sont possibles avec des pompes à chaleur/refroidisseurs

2. Cela permet de maximiser la production d'énergie de la pompe à chaleur. Sinon, elle serait gaspillée.
3. Le RCU et le RFU sont idéalement adaptés pour maximiser le profit et réduire le besoin de stratégies coûteuses de décalage des pics ou de stockage thermique plus important.
4. Les pompes à chaleur peuvent utiliser plusieurs technologies de compresseurs, selon principalement la capacité thermique de l'unité et le rapport de pression fixé par l'application.
5. Le chauffage et la climatisation simultanés contribuent à de meilleures conditions de fonctionnement pour la pompe à chaleur.
6. L'efficacité énergétique est essentielle pour rendre les pompes à chaleur compétitives face aux chaudières.
7. Les pompes à chaleur sont particulièrement efficaces lorsque leurs composants utilisent de la chaleur renouvelable ou fatale. Une grande variété de sources de chaleur peut être envisagée.

2. Technologies de production de froid

2.1. Refroidisseurs

Introduction

Un refroidisseur retire la chaleur d'un procédé, d'une machinerie ou d'un bâtiment afin de maintenir une température contrôlée. Cela se fait en faisant circuler un fluide refroidi (souvent de l'eau ou un mélange eau-glycol) qui absorbe la chaleur de la zone cible et la transfère à l'environnement.

Ils sont couramment utilisés dans les systèmes industriels, commerciaux et CVC (chauffage, ventilation et climatisation) pour refroidir des équipements, des procédés ou des bâtiments. Ainsi, des centaines à des milliers de kW de refroidissement.

Les refroidisseurs sont largement utilisés dans des industries telles que la fabrication, les établissements médicaux, les centres de données et la transformation alimentaire afin de maintenir des températures optimales.

Fonctionnement

Comme observé à la Fig. 9, le rôle de l'évaporateur est de produire de l'eau froide. L'appareil libère l'eau à environ 6°C et la pousse dans toute l'installation à l'aide d'une pompe. L'eau retourne à l'évaporateur où le fluide frigorigène absorbe la chaleur indésirable à environ 12°C.

Il existe une autre boucle reliée au condenseur, qui se trouve entre la tour de refroidissement et le condenseur. Après être entrée dans le condenseur à environ 27 °C ou température ambiante, l'eau sort à environ 5 degrés plus élevé. Noter qu'à aucun moment le fluide frigorigène ne peut dissiper la chaleur directement à travers un ventilateur extérieur [9].

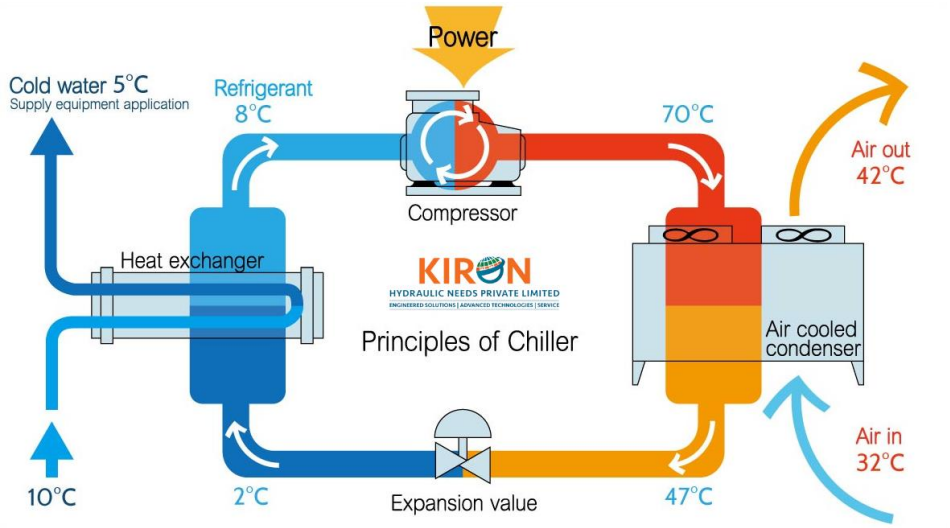


Fig. 9. Schéma de fonctionnement du refroidisseur [10].

2.1.1. Types de refroidisseurs

Les refroidisseurs sont classés selon la façon dont ils dissipent la chaleur :

1. **Refroidisseurs à air** :

   a) Utilise des ventilateurs pour souffler de l'air sur un condenseur afin de libérer la chaleur.

   b) Idéal pour les systèmes de petite à moyenne taille ou où l'accès à l'eau est limité.

   c) Courant dans les systèmes CVC commerciaux.

2. **Refroidisseurs à eau (centrifuges)** :

   a) Utilise des tours d'eau et de refroidissement pour dissiper la chaleur plus efficacement.

   b) Adapté aux applications industrielles à grande échelle où une plus grande efficacité est requise.

Tour de refroidissement : C'est là que la chaleur dissipée du condenseur se transforme en eau. Ensuite, la chaleur est dissipée dans l'air ambiant. Ils utilisent un flux d'air humide (flux d'air ambiant + pulvérisation d'eau). Ces dispositifs ouverts sur le dessus se déclinent en de nombreux modèles selon plusieurs facteurs : à flux croisés, à contre-courant, à tirage naturel et à tirage mécanique.

Refroidisseur à eau : Ils disposent d'une tour de refroidissement, de sorte que leur efficacité est supérieure à celle des groupes frigorifiques à condensation par air ; en effet, la condensation dépend ici de la température de bulbe humide ambiante, qui est inférieure à la température de bulbe sec ambiante (Fig. 10). Plus un refroidisseur condense bas, plus il est efficace. Ce système comporte plusieurs composants essentiels :

1. Tours de refroidissement
2. Pompes à eau
3. Réservoirs de stockage d'énergie thermique

Ils sont plus petits, durent plus longtemps et peuvent être placés à l'intérieur.

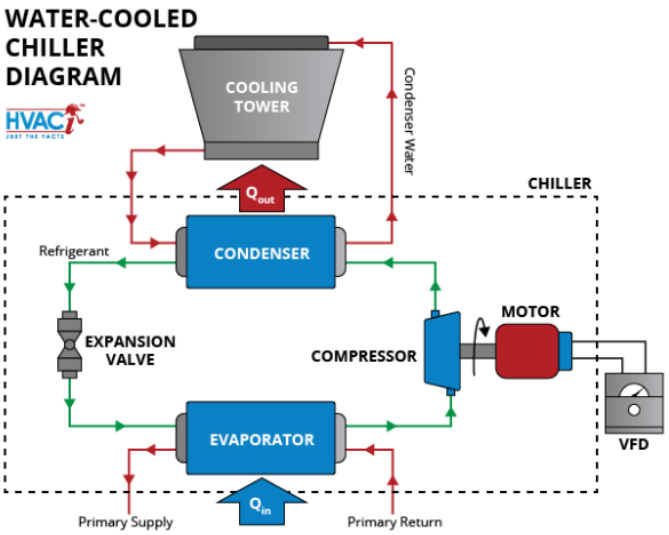


Fig. 10. Système de fonctionnement du refroidisseur refroidi par eau [11].

Refroidisseur refroidi par air (Fig. 11)

Avantages par rapport aux refroidisseurs à eau :

1. Pas de consommation d'eau.
2. Lorsqu'ils sont utilisés dans des applications à charge partielle, ces refroidisseurs sont très fiables.
3. Pas de tours de refroidissement.
4. Meilleure stabilité environnementale.
5. Faibles coûts d'entretien.
6. Plus facile à utiliser et à contrôler.
7. Coûts chimiques évités.
8. Les coûts de l'eau évités, surtout en ville.
9. Aucun problème d'eau à gérer en cas de catastrophe.

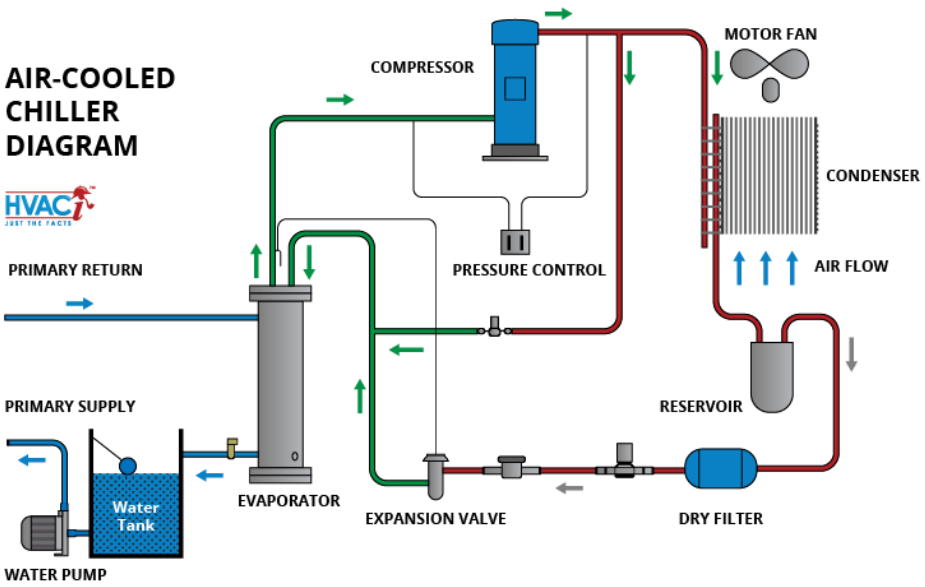


Fig. 11. Schéma de fonctionnement du refroidisseur refroidi par air [11].

2.1.2. Indicateurs clés et efficacité

1. Capacité de refroidissement (Qo) : Mesurée en tonnes de réfrigération ou en kilowatts (kW), indiquant la quantité de chaleur extraite.
2. Consommation d'énergie (W_c) : Les compresseurs consomment (kW) le plus d'électricité du système, ce qui rend leur conception essentielle pour l'efficacité. Les pompes à eau et les ventilateurs doivent être pris en compte car ils peuvent représenter 10 % de la consommation.
3. Ratio d'efficacité énergétique (EER) : Une mesure de l'efficacité calculée comme le rapport entre le refroidissement fourni et l'énergie consommée (kW de refroidissement / kW d'électricité) (Équation (1)).

$$EER = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{W}_c} \quad (1)$$

4. Ratio d'efficacité énergétique saisonnière (SEER) : Comme l'EER, mais sur toute une saison, en calculant la sortie de refroidissement divisée par l'énergie électrique totale apportée (kWh refroidissement / kWh électricité).

2.1.3. Ratio d'efficacité énergétique saisonnière (SEER)

1. SEER utilise une température intérieure fixe, ainsi que différentes températures extérieures et capacités de charge pour simuler la vie réelle.
2. La norme EN 14825 [12] définit la méthodologie du test (Tableau 2).

		Capacité			
		100%	**74%**	**47%**	**21%**
Température extérieure	**Source d'air**	35 °C	30 °C	25 °C	20 °C
	Source d'eau	30 °C	26 °C	22 °C	18 °C

Tableau 2. Exemple de type de réglage de température et de capacités de charge pour SEER

3. La classe d'efficacité énergétique dépend du SEER et du type d'équipement. Entre A+++ et G, c'est la première classification la plus efficace.

Performance du système

Cela dépend de :

1. Bon design et installation professionnelle de l'ensemble du système.
2. Entretien régulier.
3. La taille du bâtiment à climatiser et son efficacité énergétique.
4. La taille du système et sa capacité de traitement de l'air.
5. La durée d'utilisation quotidienne du système.
6. La température intérieure.
7. La température de l'air extérieur.

Ratio d'efficacité énergétique (EER)

Refroidisseurs à air :

1. EER typique : entre 9 et 12.
2. Ces systèmes sont généralement moins efficaces que les refroidisseurs à eau, mais ils conviennent davantage aux applications de petite à moyenne taille.

Refroidisseurs à eau :

1. EER typique : entre 12 et 15, atteignant des valeurs supérieures à 15 pour les modèles à haute efficacité.
2. Les refroidisseurs refroidis par eau sont plus efficaces, surtout dans les applications à grande échelle ou industrielles, en raison de la capacité de dissipation thermique plus élevée de l'eau par rapport à l'air.

Grands refroidisseurs industriels :

1. Les refroidisseurs industriels à haute performance peuvent avoir un EER supérieur à 15 selon leur taille et leur application.

Applications des refroidisseurs

1. Systèmes CVC
2. Procédés industriels (transformation alimentaire, transformation plastique, finition métallique...)
3. Centres de données
4. Réfrigération
5. Soins de santé
6. Centrales électriques
7. Patinoires
8. Refroidissement urbain

2.2. Machines de réfrigération à absorption

2.2.1. Type de refroidisseurs

Refroidisseurs à compresseur de vapeur

Un compresseur est la force motrice pour pomper le fluide frigorigène dans le système. De l'électricité est nécessaire pour activer le moteur mécaniquement connecté au compresseur.

2.2.2. Refroidisseurs à absorption de vapeur

Les refroidisseurs à absorption de vapeur ne possèdent pas de compresseur dans l'unité. Ils utilisent plutôt une source de chaleur, par exemple de l'énergie solaire ou de la chaleur fatale, pour faire circuler le liquide de refroidissement dans le système. Aucune électricité n'est requise. De plus, ils sont plus silencieux et résistants aux fuites car il n'existe pas d'éléments vibrants. Les gaz utilisés sont uniquement à base de fluides frigorigènes naturels.

Cette section expliquera le fonctionnement des refroidisseurs à absorption de vapeur.

2.2.3. Réfrigération par absorption

Ils utilisent une source de chaleur pour entraîner le cycle de réfrigération (au lieu d'énergie mécanique comme les compresseurs). Ces systèmes utilisent généralement du fluide frigorigène et un fluide absorbant (Fig. 12).

1. Le processus commence avec un liquide de refroidissement liquide dans un évaporateur, ce qui le rend gazeux.
2. Ensuite, le liquide de refroidissement gazeux est absorbé par un absorbant concentré, tel que le bromure de lithium ou l'ammoniac, fourni par un générateur.
3. Enfin, la solution diluée absorbe le liquide de refroidissement tandis que l'eau de refroidissement absorbe la chaleur.
4. La solution diluée de liquide de refroidissement et d'absorbant passe par un échangeur de chaleur jusqu'au générateur, où elle est chauffée.
5. Le liquide de refroidissement se vaporise hors de la solution, se condense, puis est renvoyé pour refroidir. L'absorbant désormais concentré est également recyclé.

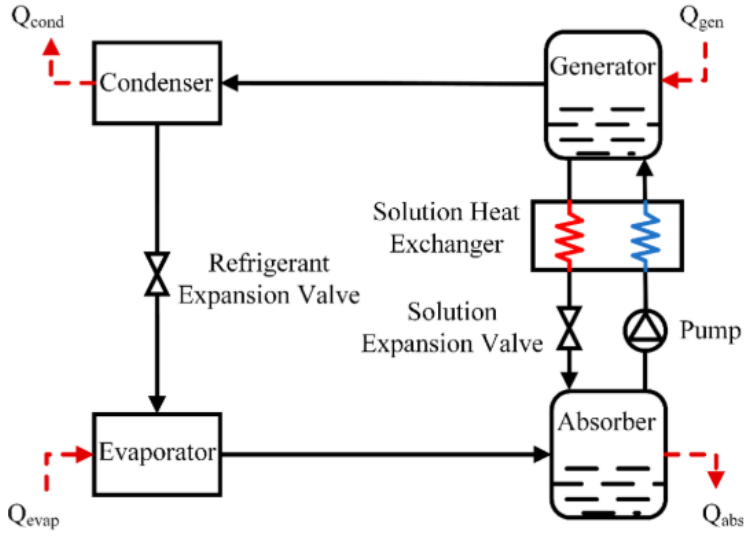


Fig. 12. Machine à absorption [13].

Principaux éléments :

1. Évaporateur : Où le fluide frigorigène absorbe la chaleur et s'évapore.
2. Absorbeur : Lorsque la vapeur de fluide frigorigène est absorbée par le fluide absorbant.
3. Générateur : Lorsque le fluide frigorigène est séparé de l'absorbant par la chaleur, régénérant ainsi le fluide frigorigène.
4. Condenseur : Où le fluide frigorigène libère de la chaleur et se condense à nouveau en liquide.

Étapes de réfrigération par absorption :

Évaporation : L'évaporateur du système est l'endroit où le fluide frigorigène (généralement l'ammoniac ou l'eau) absorbe la chaleur de l'espace ou de l'objet à refroidir. La chaleur provoque l'évaporation du fluide frigorigène, le transformant d'un liquide à basse pression en vapeur.

Absorption : La vapeur de fluide frigorigène s'écoule vers l'absorbeur, où elle est absorbée par une solution liquide absorbante (généralement de l'eau dans les systèmes ammoniac-eau ou bromure de lithium dans les systèmes eau-bromure de lithium). Ce processus se produit à une pression plus basse.

Production : Un générateur utilise une source de chaleur (par exemple, brûleur à gaz, eau chaude, chaleur fatale, chaleur renouvelable) pour séparer le fluide frigorigène de l'absorbant. La chaleur appliquée à l'absorbeur fait vaporiser le fluide frigorigène et quitte l'absorbant. Cette étape régénère le fluide frigorigène, qui retourne maintenant au condenseur.

Condensation : La vapeur du fluide frigorigène se déplace ensuite vers le condenseur, libérant de la chaleur (provenant du générateur) vers l'environnement. Elle se condense à nouveau en un liquide fluide frigorigène à haute pression, qui est ensuite renvoyé à l'évaporateur, et le cycle se répète.

La solution absorbante : Après que le fluide frigorigène a été séparé de l'absorbant dans le générateur, l'absorbant concentré (après avoir perdu le fluide frigorigène) est renvoyé à l'absorbeur pour commencer le cycle.

Propriétés des substances utilisées dans les systèmes de réfrigération à absorption

1. Le fluide frigorigène doit être plus volatil que l'absorbant, ce qui signifie que le point d'ébullition du fluide frigorigène doit être bien plus bas que l'absorbant, donc la solution dans le générateur doit simplement être chauffée à la température d'ébullition du fluide frigorigène.
2. Le fluide frigorigène doit présenter une grande solubilité avec la solution dans l'absorbeur.
3. L'absorbant doit avoir une forte affinité pour le fluide frigorigène, ce qui minimisera la quantité de fluide frigorigène circulée.
4. La pression de fonctionnement doit être faible, donc les parois des calandres et des tuyaux de liaison n'ont pas besoin d'être épaisses.
5. Il ne doit pas subir de cristallisation ou de solidification du système. Car la cristallisation bloquera le libre écoulement des solutions dans la ligne.
6. Le mélange doit être sûr, chimiquement stable, non corrosif, peu coûteux et facilement disponible. Le fluide frigorigène doit avoir une forte chaleur de vaporisation.

2.2.4. Types de systèmes de réfrigération à absorption

Concernant les exigences précédentes, il existe deux mélanges (fluide frigorigène/absorbant) :

Pour les applications en dessous de 50°C Ammoniac-Eau (NH3-H2O) : L'un des systèmes les plus couramment utilisés dans des applications à grande échelle comme le refroidissement industriel, où l'ammoniac est le fluide frigorigène et l'eau absorbante.

En contrepartie, l'eau est volatile et ne peut pas être facilement séparée de l'ammoniac. Un redresseur devrait améliorer l'efficacité ; le cycle est plus complexe que l'autre mélange. Comme l'ammoniac n'est pas compatible avec des matériaux comme le cuivre ou le laiton, l'ensemble du système est normalement fabriqué en acier. L'ammoniac est inflammable et hautement toxique.

Pour les applications au-dessus de 50°C (principalement climatisation) Bromure d'eau-lithium (LiBr) : couramment utilisé pour la climatisation et l'eau chaude dans les grands bâtiments et les applications commerciales. Dans ce cas, l'eau est le fluide frigorigène, et le bromure de lithium est l'absorbant. Le principal problème de ce mélange est la possibilité de solidification à 0 °C. Le LiBr cristallise également à des concentrations modérées. D'autres inconvénients du mélange sont la basse pression (vide) et la viscosité élevée de la solution. L'air ambiant peut s'infiltrer dans la machine. Il présente des avantages tels qu'une sécurité élevée, un taux de volatilité, une affinité, une stabilité et une chaleur latente. Ils s'adaptent à la charge en variant le taux de reconcentration de l'absorbant.

Paramètres pertinents

1. Capacité de refroidissement ($\dot{Q}_o$) : La quantité de chaleur retirée par l'évaporateur de l'espace ou du procédé en cours de refroidissement, généralement mesurée en kW.

2. Entrée de chaleur ($\dot{Q}_g$) : La chaleur nécessaire pour entraîner le cycle d'absorption, généralement fournie par une source de chaleur comme le gaz naturel, la chaleur fatale ou l'énergie solaire. Elle est souvent mesurée en kW.
3. Coefficient de performance (COP) : Le rapport de capacité de refroidissement ($\dot{Q}_o$) à l'apport de chaleur ($\dot{Q}_g$) (Équation (2)).

$$COP = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{Q}_g} \quad (2)$$

Le COP est un indicateur clé de performance de l'efficacité énergétique. Un COP plus élevé indique un système plus efficace. En réfrigération par absorption, les valeurs typiques de COP varient de 0,5 à 1,5, ce qui est nettement inférieur à celui des systèmes de compression vapeur.

Avantages de la réfrigération par absorption :

1. Pas de pièces mobiles : Comme elle ne dépend pas des compresseurs, la réfrigération par absorption est mécaniquement plus simple et souvent plus fiable.
2. Flexibilité des sources d'énergie : Elle peut être alimentée par différentes sources d'énergie, telles que le gaz naturel, l'énergie solaire ou la chaleur fatale, ce qui la rend adaptée aux applications hors réseau ou renouvelables.
3. Fonctionnement silencieux : Comme il n'existe pas de compresseurs mécaniques, ces systèmes fonctionnent silencieusement.

Inconvénients de la réfrigération par absorption :

1. Efficacité : Les systèmes de réfrigération par absorption sont généralement moins efficaces que les systèmes conventionnels à compresseurs, nécessitant un apport calorifique important.
2. Coût initial plus élevé : Cette technologie peut être plus coûteuse à installer, surtout pour les unités plus grandes.
3. Réponse lente : Ces systèmes peuvent mettre plus de temps à s'adapter aux variations de la demande de refroidissement que les systèmes basés sur la compression.
4. Entretien complexe : Ils nécessitent un entretien minutieux, en particulier avec la solution absorbante, qui doit être vérifiée pour la bonne concentration et la contamination.

Comparé aux systèmes de compression de vapeur (Fig. 13) :

Systèmes à compression	Systèmes à absorption
Fonctionnent grâce à un **travail mécanique**	Fonctionnent grâce à un **apport de chaleur**
COP élevé	**COP plus faible** (actuellement, maximum ≈ 1,4)
Les performances (COP et capacité frigorifique) sont **très sensibles** à la température d'évaporation	Les performances sont **peu sensibles** à la température d'évaporation
Le COP diminue considérablement en **charge partielle**	Le COP ne diminue pas de manière significative lorsque la charge varie
La présence de liquide à la sortie de l'évaporateur peut endommager le compresseur	La présence de liquide à la sortie de l'évaporateur ne constitue pas un problème majeur
Nombreuses pièces en mouvement	Très peu de pièces en mouvement
Entretien régulier nécessaire	Très faible besoin de maintenance
Niveau de bruit et vibrations élevés	Bruit et vibrations réduits
Les petits systèmes sont compacts, tandis que les grands systèmes sont encombrants	Les petits systèmes sont encombrants, tandis que les grands systèmes sont compacts
Économique lorsque l'électricité est peu chère	Économique lorsqu'une source de chaleur peu coûteuse ou de chaleur fatale est disponible

Fig. 13. Systèmes d'absorption comparés aux systèmes de compression [14].

Applications

1. Climatisation commerciale
2. Refroidissement industriel
3. Centres de données
4. Réfrigération
5. La climatisation dans des lieux isolés
6. Systèmes de récupération de la chaleur usagée
7. Soins de santé et hôpitaux
8. Applications solaires thermiques
9. Centrales thermiques et électriques combinées (CHP)
10. Réseaux de chauffage et de climatisation urbains

2.3. Stockage d'énergie thermique (TES)

Le stockage d'énergie thermique (TES) stocke la chaleur ou le refroidissement pour une utilisation ultérieure, séparant la production de la consommation. Le concept est similaire aux batteries électriques, mais au lieu de stocker l'électricité, le chauffage ou le « refroidissement » est stocké, augmentant la température d'un fluide, ou utilisant un changement de phase (généralement solide en liquide et inversement). Cela signifie que le chauffage ou le refroidissement peuvent être générés lorsqu'une électricité excédentaire ou renouvelable, ou de la chaleur fatale, est disponible, puis consommée lorsque nécessaire. Cela est particulièrement intéressant dans les RFU, où le refroidissement central ou le refroidissement des déchets est indépendant des consommateurs individuels ou industriels.

Types de stockage d'énergie

1. Mécanique : Air comprimé, pompe hydraulique, volant d'inertie...
2. Électrochimique : Batterie.
3. Électricité : Supercondensateurs, stockage magnétique supraconducteur d'énergie.
4. Chimique : Hydrogène.
5. Thermique : Sensible, latente, thermochimique.

2.3.1. Principal avantage de TES

Dans les RFU, le TES consiste généralement à stocker de l'énergie fraîche dans un réservoir d'eau isolé. Le réservoir est refroidi ou gelé pendant les périodes creuses (nuits ou week-ends) et fondu ou réchauffé pendant les périodes de pointe (en semaine) (Fig. 14).

Cela réduit le besoin de grands refroidisseurs pendant les pics de demande en déchargeant des TES pour couvrir une partie ou la totalité de la charge. La capacité supplémentaire des refroidisseurs charge les TES pendant les heures creuses tout en répondant aux charges de refroidissement hors pointe.

Les refroidisseurs de moindre capacité réduisent les coûts d'investissement et d'exploitation et diminuent le stress électrique lié au réseau.

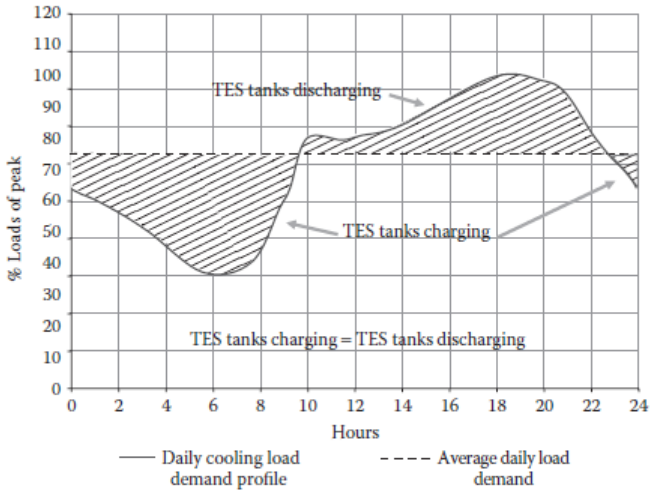


Fig. 14. Périodes de chargement et de décharge du réservoir TES [15].

2.3.2. Type de TES (Tableau 3)

En général, les technologies TES pour le stockage par refroidissement comprennent trois types distincts :

Les systèmes de stockage latent de chaleur, tels que les TES de glace ou les matériaux à changement de phase (PCM), stockent l'énergie thermique sous forme de changement de phase du milieu de stockage, généralement entre l'état solide et liquide. Les variations de température du milieu ne sont pas pertinentes pour le stockage de la chaleur mais dépendent plutôt de l'état changeant d'un milieu.

Les PCM ont été développés pour stocker la chaleur dans leur masse sous forme de chaleur latente à une température spécifique. Ces matériaux sont couramment utilisés dans les applications solaires et les matériaux de construction, où ils absorbent et stockent l'excès de chaleur de bâtiment.

Des systèmes de stockage de chaleur sensibles, basés sur de l'eau refroidie et des fluides à basse température, stockent l'énergie thermique sous forme de variation de température dans le milieu de stockage. Ils utilisent de l'eau ou de la roche pour stocker et libérer de l'énergie thermique. Ce type de stockage d'énergie thermique est particulièrement applicable aux bâtiments résidentiels.

Systèmes de stockage thermochimique de chaleur, basés sur des réactions chimiques.

Stockage d'énergie thermique par forage et stockage d'énergie thermique par aquifère, à long terme.

	Réservoir de stockage de glace	**Réservoir d'eau refroidie**	**Réservoir de stockage de liquides 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
Installation de refroidissement de recharge et	0,8 à 1,1 kW/tonne (0,23 à 0,31)	0,6 à 0,7 kW/tonne (0,23 à 0,31)	0,7 à 0,8 kW/tonne (0,23 à 0,31)

alimentation électrique (kW d'électricité en entrée/kW thermique sortie)			

Tableau 3. Types de réservoirs TES [16].

Applications

1. Établissements éducatifs : écoles, collèges et universités.
2. Établissements de santé : hôpitaux, cliniques, laboratoires et recherche médicale.
3. Aéroports, musées : complexes sportifs et de divertissement.
4. Installations gouvernementales : militaires ; de recherche ; administratives ; et correctionnelles.
5. Industrie privée : installations commerciales et industrielles (y compris l'aéronautique et l'aérospatiale, l'automobile, l'informatique, le traitement des données, l'électronique, la pharmacie, les télécommunications.
6. Réseaux de refroidissement urbain : Systèmes de services publics vendant du froid à plusieurs clients.
7. Services énergétiques/Contrats de performance : projets financés par des tiers, financés par des économies liées à l'efficacité énergétique.
8. Refroidissement des turbines : augmentation de la puissance en temps chaud et de l'efficacité des centrales à turbines à combustion.

TES à chaleur latente

Avantages :

1. Densité d'énergie plus élevée : Les systèmes de stockage de chaleur latent peuvent stocker plus d'énergie dans un volume plus petit car ils stockent de l'énergie lors des changements de phase (par exemple, de liquide à gaz ou de solide à liquide), qui se produisent à température constante.
2. Température stable : La température reste constante pendant le changement de phase, ce qui facilite la gestion des sorties thermiques.
3. Efficace pour les systèmes à grande échelle : En raison de la densité énergétique plus élevée, la chaleur latente TES est souvent plus efficace dans les systèmes de refroidissement ou de chauffage centralisés plus grands.

Inconvénients :

1. Complexité : Les systèmes TES à chaleur latente ont tendance à être plus complexes et coûteux à concevoir et à exploiter en raison du besoin de matériaux spécialisés (comme les matériaux à changement de phase).
2. Limitations des matériaux : Les performances du stockage de chaleur latente dépendent fortement du choix du matériau à changement de phase, qui peut avoir des limitations en termes de plage de température, de stabilité des cycles et de coût.

TES à chaleur sensible

Avantages :

1. Conception plus simple : Le stockage de chaleur sensible consiste à chauffer ou refroidir un milieu de stockage (par exemple, eau ou roche), ce qui est plus simple et moins coûteux à mettre en œuvre que les systèmes de chauffage latent (chauffage latent thermique).
2. Large gamme de matériaux : Les TES à chaleur sensible peuvent utiliser une variété de matériaux (comme l'eau, l'air ou les pierres), qui sont largement disponibles et peu coûteux.
3. Technologie éprouvée : Les systèmes de chauffage sensibles sont largement utilisés et compris, avec des caractéristiques de performance établies.

Inconvénients :

1. Densité énergétique plus faible : Les systèmes de chaleur sensible stockent moins d'énergie dans le même volume que les systèmes à chaleur latente, car l'énergie est stockée en modifiant la température du milieu, et non par changement de phase.
2. Fluctuations de température : La température du milieu de stockage varie au fur et à mesure qu'il se charge et se décharge, ce qui peut le rendre plus difficile à gérer et moins constant que les systèmes de chaleur latente.

Intégration de TES dans RFU (Fig. 15)

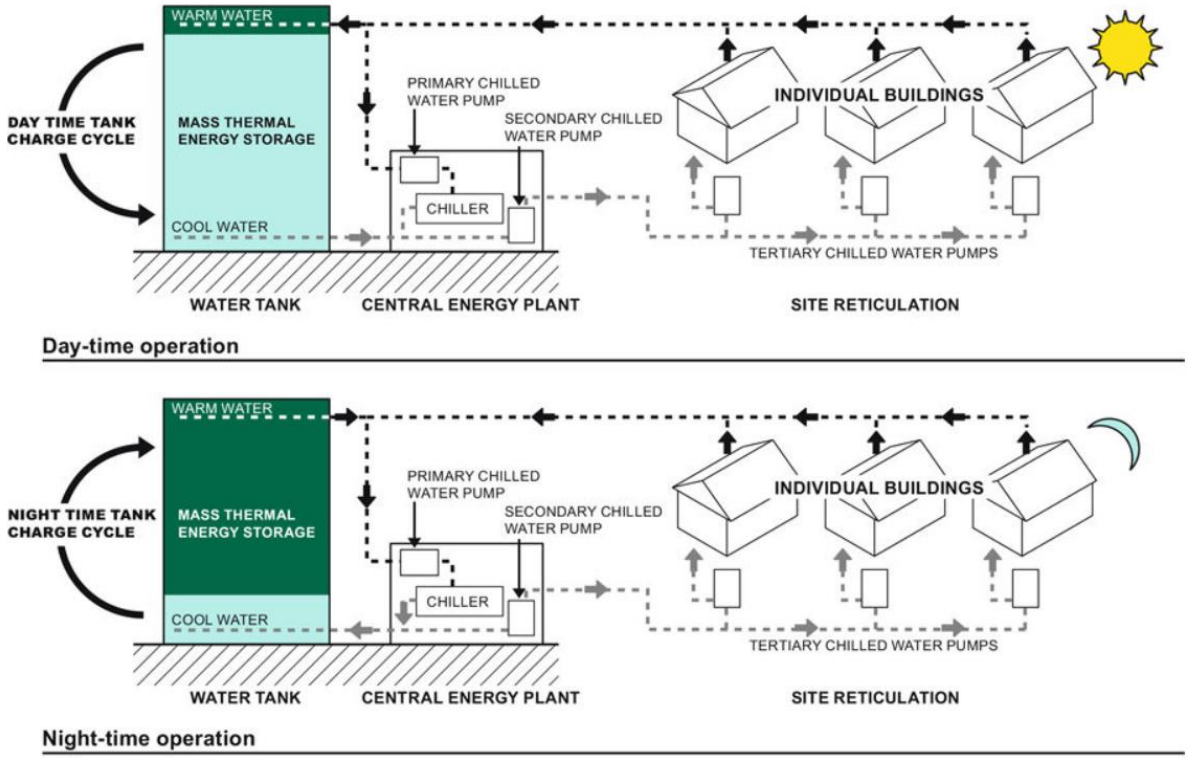


Fig. 15. Intégration du réservoir TES dans le RFU [17].

Avantages généraux de l'intégration de TES dans le RFU :

1. Le coût global de l'installation est plus faible en raison de la réduction de la capacité installée de l'installation de l'installation de l'installation de réfrigération. La taille de l'équipement de réfrigération est plus petite car il est conçu pour des charges moyennes plutôt que pour des pics.
2. Les coûts d'exploitation sont réduits par rapport à un système de refroidissement en ligne car la consommation maximale peut être évitée lors des périodes de tarif électrique élevé.

3. L'impact environnemental est réduit grâce à la réduction du CO_2. Le stockage de l'énergie et l'amélioration de l'efficacité opérationnelle avec le réservoir de stockage d'énergie thermique contribuent à réduire encore davantage les émissions de CO_2 d'un système de refroidissement urbain.
4. La dimension du système de réfrigération pourrait être réduite. Cela s'explique par le fait que la capacité de réfrigération de l'énergie produite par l'unité sera inférieure en raison de l'énergie déjà accumulée dans le réservoir. Par conséquent, un système de réfrigération plus petit peut être utilisé.

2.4. Combinaison de systèmes mécaniques et d'absorption à énergie thermique.

Introduction

Une combinaison de systèmes mécaniques (comme la réfrigération par compression de vapeur) et de systèmes d'absorption thermiques (Fig. 16). Elle intègre deux technologies de refroidissement distinctes pour améliorer la performance globale du système, l'efficacité énergétique et la durabilité. Elles peuvent être combinées via le condenseur, dans lequel la chaleur rejetée par le système de compression de vapeur est utilisée comme chaleur utile par un autre cycle, comme le système d'absorption. Sinon, cette chaleur serait rejetée vers l'ambiant et perdue. Elle maximise donc l'efficacité énergétique de l'ensemble du système.

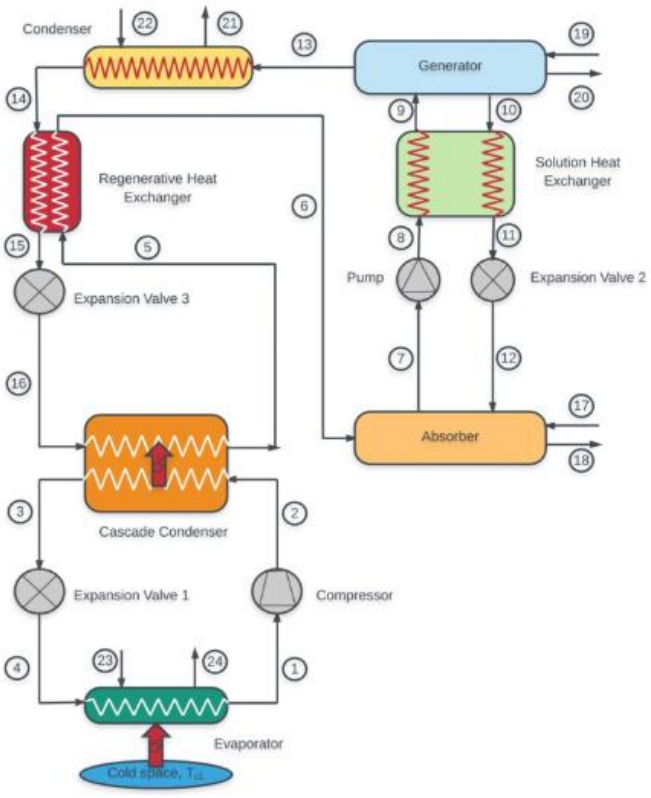


Fig. 16. Schéma de combinaison des systèmes mécaniquement entraînés et des systèmes d'absorption à énergie thermique [18].

Applications

Les systèmes de compression de vapeur et les systèmes de réfrigération par absorption, lorsqu'ils sont combinés, sont particulièrement adaptés aux applications dans des zones nécessitant à la fois refroidissement et chauffage, ou où il est nécessaire d'utiliser un excès de chaleur, comme dans les

systèmes de chauffage et de climatisation urbains, les usines industrielles ou les grands bâtiments commerciaux.

La combinaison de ces systèmes permet à la configuration hybride de tirer parti des points forts de chaque technologie.

Par exemple, lors des périodes de faible demande de refroidissement ou lorsque la chaleur d'eau est disponible, le système d'absorption peut prendre le relais, réduisant la consommation d'électricité.

En revanche, lors d'une forte demande ou lorsque l'énergie thermique est insuffisante, le système mécanique peut être activé pour fournir une capacité de refroidissement supplémentaire.

Cette intégration aide à optimiser la consommation d'énergie, à réduire les coûts d'exploitation et à contribuer à la durabilité grâce à des sources thermiques renouvelables comme la chaleur fatale ou l'énergie solaire. De plus, le système peut fonctionner dans différentes conditions de température, offrant flexibilité et adaptabilité.

Paramètres clés

Dans ce cas, la COP prend en compte l'ensemble des entrées et sorties du système (Équ. (3)) :

COPc : coefficient de performance combiné (système global)

$\dot{Q}_{cas,\,cond}$: charge en cascade du condenseur

$\dot{Q}_g$: charge thermique entrée

$\dot{W}_C$: consommation électrique du compresseur

$\dot{W}_P$: consommation d'énergie par pompe

$$COP_C = \frac{\dot{Q}_{cas,\,cond}}{(\dot{Q}_g + \dot{W}_C + \dot{W}_P)} \quad (3)$$

Avantages

1. Meilleure efficacité énergétique (COP amélioré).
2. Empreinte carbone réduite.
3. Adaptabilité à diverses sources de chaleur.
4. Fonctionnement à basse température.
5. Faible consommation d'énergie dans la partie absorption.

Inconvénients

1. Complexité plus élevée et coût initial
2. Coûts d'entretien plus élevés
3. Efficacité variable
4. Besoins en taille et espace plus grands
5. Limitations de la capacité de refroidissement
6. Chaleur supplémentaire requise

Applications de ce système

1. Réfrigération industrielle
2. Systèmes de refroidissement urbain
3. Centrales thermiques et électriques combinées (CHP)
4. Chauffage et Refroidissement combinés
5. Industries chimiques et pétrochimiques

6. Centres de données

Chauffage et refroidissement urbains avec récupération de la chaleur perdue

1. Transport réfrigéré
2. Patinoires et arènes sportives
3. Applications pharmaceutiques et médicales
4. Système de refroidissement solaire

Cependant, ils ne sont pas largement utilisés en raison de leurs coûts et de leur complexité. Des avancées technologiques ou des réglementations favorisant leur utilisation sont nécessaires pour entrer sur le marché.

2.5. Conclusions

Les refroidisseurs refroidis par air et refroidis par eau diffèrent significativement par leurs avantages et inconvénients, influençant le choix du système selon l'application et le climat. Les performances des pompes à chaleur et refroidisseurs sont généralement quantifiées par leur COP (Coefficient de Performance) et leur EER (Ratio d'efficacité énergétique), qui reflètent le fonctionnement nominal, tandis que les COP et EER saisonniers offrent une évaluation plus réaliste en tenant compte de la performance toute l'année. Les refroidisseurs à absorption, qui fonctionnent avec de la chaleur plutôt que de l'électricité, peuvent être alimentés au gaz naturel, mais leur durabilité est grandement renforcée par des sources renouvelables, de la chaleur fatale ou des réseaux de chauffage urbain. Ces systèmes reposent sur deux fluides de travail, dont l'adéquation doit être évaluée selon l'application spécifique. Alors que le stockage d'énergie thermique est traditionnellement réalisé par une chaleur sensible dans les réservoirs, les matériaux à changement de phase et le stockage thermochimique offrent des alternatives prometteuses pour le stockage à moyen et long terme. Enfin, combiner les technologies de compression et d'absorption de vapeur peut optimiser la production de refroidissement, notamment dans les applications nécessitant un chauffage et un refroidissement simultanés, permettant une production d'énergie thermique diversifiée et une meilleure gestion des charges maximales.

3. Fluides frigorigènes

3.1. Introduction

Définition :

Selon l'Institut international de réfrigération (IIR) : un fluide frigorigène est une substance ou un mélange, généralement fluide, utilisé dans un cycle de réfrigération pour

1. absorber la chaleur à basse température et pression et
2. Libérer-le à une température et pression plus élevées.

Ce transfert de chaleur se produit lorsque le fluide frigorigène change de phase, généralement du liquide au gaz, et inversement, permettant le refroidissement ou le chauffage dans des applications telles que la réfrigération, la climatisation et les pompes à chaleur.

Fluide frigorigène primaire vs. fluide frigorigène secondaire (Fig. 17)

Fluide frigorigène primaire (tuyaux bleus), également appelé fluide de travail.

1. Rejette la chaleur à une pression/température plus élevée
2. Il l'absorbe à une pression/température plus basse

Fluide frigorigène secondaire (tuyau rouge), également connu sous le nom de :

1. Liquide secondaire.
2. Liquide de refroidissement secondaire.
3. Fluide de transfert de chaleur.

« Tout fluide utilisé pour transférer la chaleur des produits à refroidir vers le fluide frigorigène primaire »

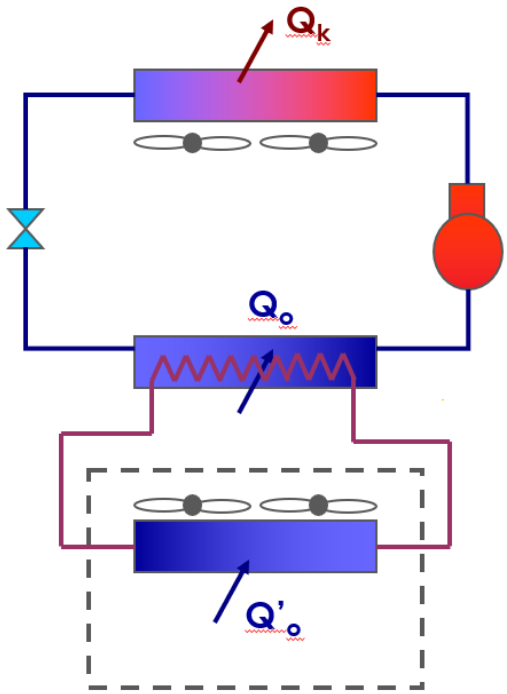


Fig. 17. Schéma du cycle du fluide frigorigène primaire et du cycle du fluide frigorigène secondaire [3].

Importance des fluides frigorigènes

La valeur marchande mondiale des produits fluides frigorigènes a atteint 20,05 milliards de dollars américains en 2022 et devrait croître significativement, atteignant environ 36,77 milliards de dollars d'ici 2030. La région Asie-Pacifique devrait dominer cette croissance, avec une contribution du marché passant de 6,42 milliards de dollars américains en 2022 à environ 12,85 milliards de dollars américains d'ici 2030 (Statista, 2025). Il s'agit d'un marché en évolution, avec des fluides frigorigènes couramment utilisés comme R134a principalement pour la climatisation automobile, la réfrigération commerciale et les refroidisseurs, R32 pour la climatisation résidentielle, et l'isobutane pour les réfrigérateurs domestiques. Des alternatives émergentes comme le dioxyde de carbone pour la réfrigération commerciale et le propane pour les applications résidentielles gagnent également en popularité. L'utilisation et le développement des fluides frigorigènes sont strictement réglementés dans le cadre d'accords internationaux tels que le Protocole de Montréal et le Protocole de Kyoto, qui visent à minimiser l'impact environnemental et à éliminer progressivement les substances à fort potentiel de réchauffement climatique [19].

L'Institut international de réfrigération estime :

Le secteur mondial de la réfrigération, de la climatisation et des pompes à chaleur comprend environ 3 milliards de systèmes, dont environ 1,5 milliard de réfrigérateurs résidentiels. Cette industrie emploie près de 12 millions de personnes dans le monde et est responsable d'environ 17 % de la consommation mondiale d'électricité. L'impact environnemental de ces systèmes est significatif :

environ 20 % de leur contribution au réchauffement climatique provient des émissions directes dues aux fuites de fluides frigorigènes fluorocarbonés — généralement comprises entre 5 % et 30 % — tandis que les 80 % restants sont attribués aux émissions indirectes de l'électricité à base de combustibles fossiles nécessaire à leur fonctionnement. Une réduction progressive coordonnée à l'échelle mondiale des fluides frigorigènes hydrofluorocarbonés (HFC) pourrait potentiellement empêcher jusqu'à 0,5 °C d'augmentation de la température mondiale d'ici 2100, soulignant le rôle crucial de la gestion des fluides frigorigènes et de l'efficacité énergétique dans la lutte contre le changement climatique [20].

Classification de base des fluides frigorigènes

Fluide pur : C'est une substance unique avec une composition chimique et des propriétés cohérentes. En réfrigération, les fluides purs subissent des changements de phase (liquide en gaz et inversement) sans se séparer en composants différents.

Mélange : Un fluide frigorigène peut être soit un composé pur, soit un mélange (mélange) de deux fluides frigorigènes ou plus (Fig. 18) :

a) Mélange zéotropique (non azéotropique). Lors de l'évaporation, le composant le plus volatil évapore en premier, et le composant le moins volatil dure. L'inverse se produit lors de la condensation. Cela entraîne une évaporation glissante et une température de condensation le long de la surface de transfert de chaleur.
b) Mélange azéotrope. Les phases vapeur et liquide en équilibre ont des compositions identiques (ou presque identiques) dans des conditions de composition et de pression données.

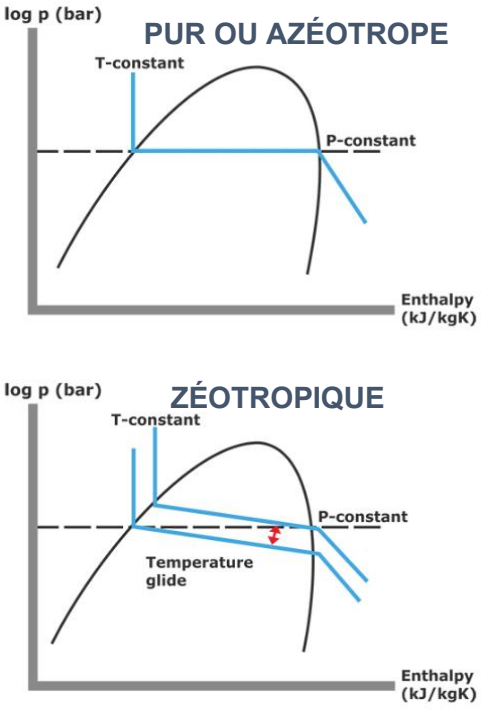


Fig. 18. Diagramme P-h pur ou azéotropique et zéotropique [21].

Fluide pur : La pression et la température sont constantes sous changement de phase, ce qui permet de définir l'autre (Fig. 19).

Lors du changement de phase :

P→T et T→P

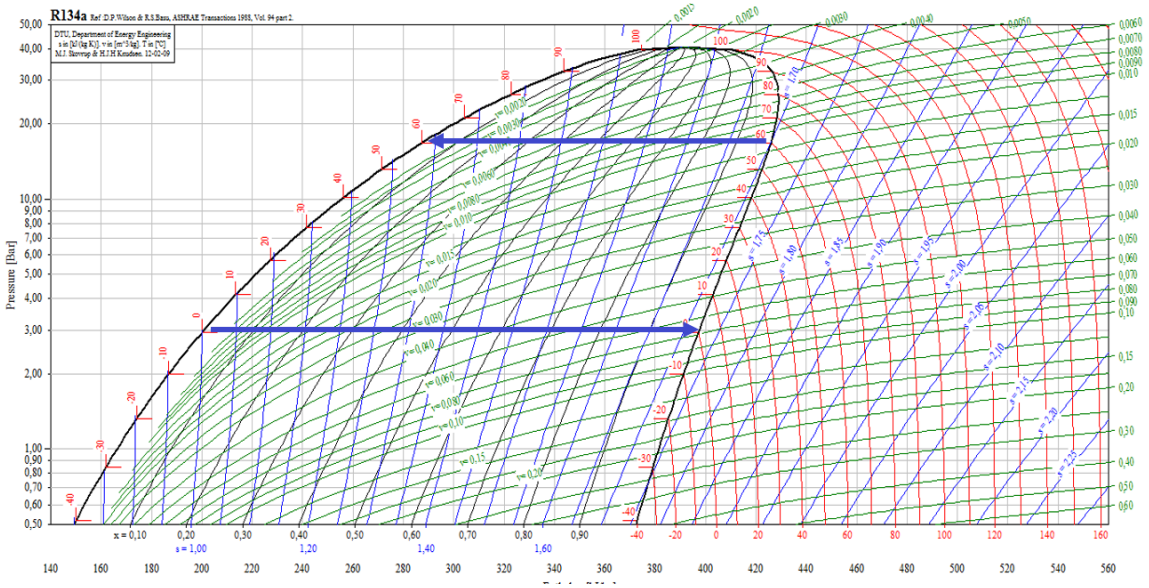


Fig. 19. Propriétés du diagramme P-h du fluide pur [22].

Mélange azéotropique : La composition et la température du zéotrope ne changent pas de manière significative lorsque l'azéotrope s'évapore ou se condense sous pression constante (Fig. 20).

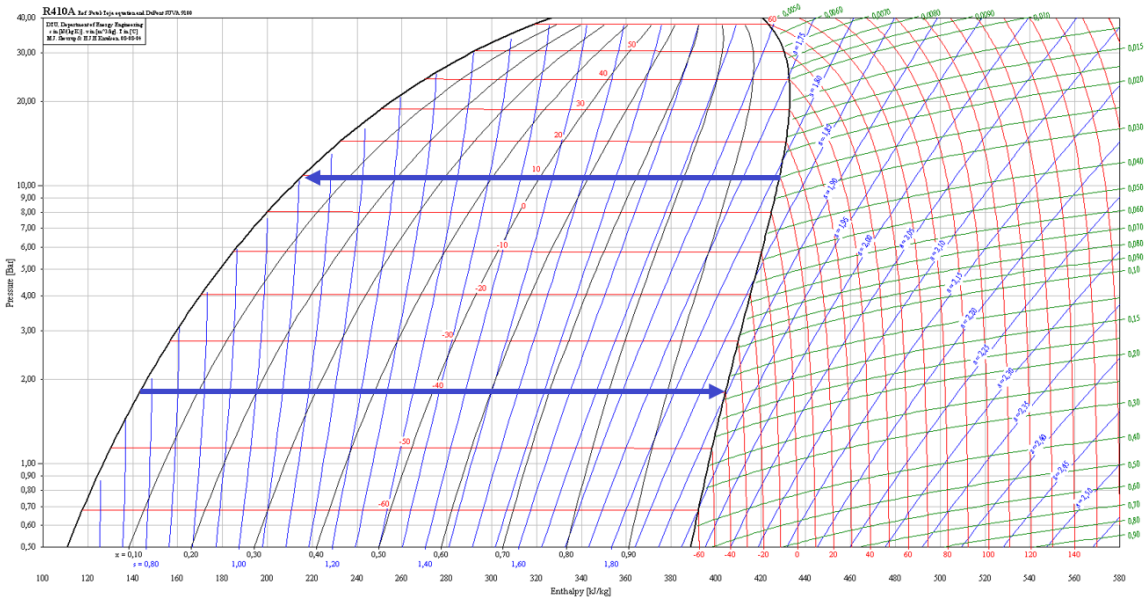


Fig. 20. Propriétés du diagramme P-h du mélange azéotropique [22].

Mélange zéotropique : Sous pression constante, lors du changement de phase liquide-vapeur, la température et la composition d'un zéotrope varient. P-T nécessite une définition d'un autre paramètre (Fig. 21).

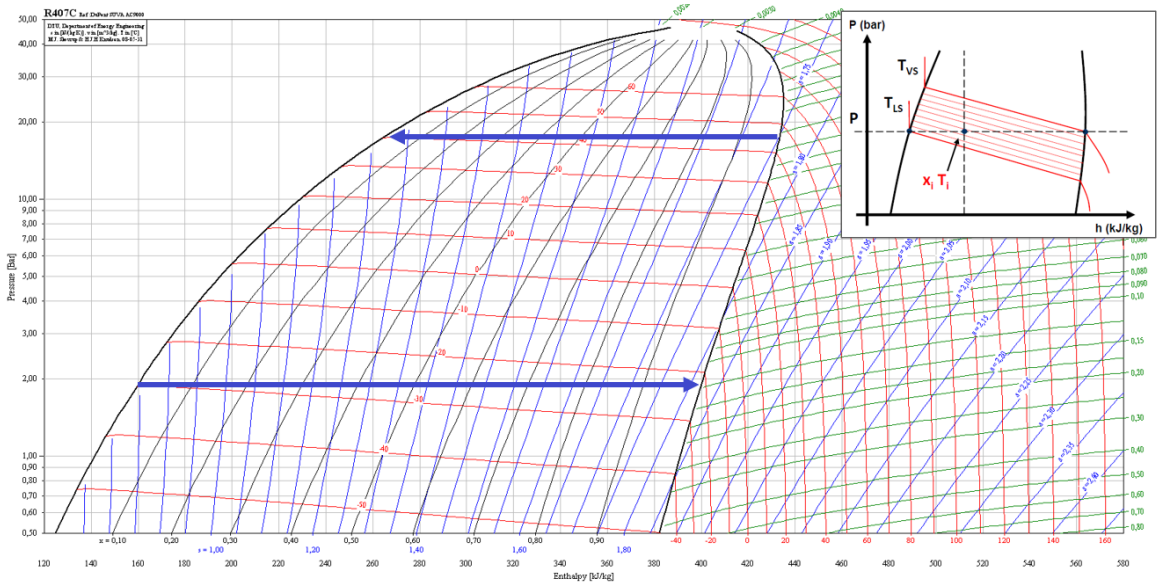


Fig. 21. Propriétés du diagramme P-h du mélange zéotropique [22].

Les mélanges zéotropiques nécessitent des mesures particulières pour la détermination des propriétés, le calcul des paramètres, la manipulation, etc. Un mélange zéotrope avec un glissement de température faible (inférieure à 0,5 à 1 K, selon la source) est dit proche de l'azéotropie et peut être considéré comme un mélange azéotrope en termes pratiques.

3.2. Histoire et évolution

La première génération de fluides frigorigènes est apparue au XIXe siècle, bien avant l'avènement de la chimie synthétique. Durant cette période, les substances naturelles étaient couramment utilisées pour la réfrigération en raison de leur disponibilité et de leurs propriétés thermodynamiques favorables. Celles-ci comprenaient l'ammoniac (NH_3), le dioxyde de carbone (CO_2), le dioxyde de soufre (SO_2), les hydrocarbures tels que le propane et le butane, ainsi que l'eau (H_2O) et l'air. Bien qu'efficaces en termes de performance, ces fluides frigorigènes présentaient d'importants défis de sécurité et techniques : toxicité dans le cas du SO_2 et du NH_3, inflammabilité des hydrocarbures comme le propane, et exigences de fortes pressions de fonctionnement avec du CO_2. Malgré ces limitations, cette génération a posé les bases des technologies modernes de réfrigération [19].

Deuxième génération (années 1930–1990) : L'essor des fluides frigorigènes synthétiques

Motivée par le besoin de systèmes de réfrigération plus sûrs et plus efficaces, la deuxième génération a vu l'introduction de fluides frigorigènes synthétiques, principalement les chlorofluorocarbures (CFC) et les hydrochlorofluorocarbures (HCFC). Des exemples courants incluaient le CFC-12 (dichlorodifluorométhane) et le HCFC-22 (chlorodifluorométhane). Ces substances ont rapidement gagné en popularité grâce à leurs propriétés avantageuses : elles étaient non inflammables, non toxiques, chimiquement stables et assuraient un transfert de chaleur efficace. Cependant, dans les années 1970 et 1980, des recherches scientifiques ont révélé que les CFC et les HCFC étaient des contributeurs majeurs à la déplétion de la couche d'ozone stratosphérique. Cette découverte a suscité une large inquiétude environnementale et conduit à des mesures réglementaires internationales, notamment le Protocole de Montréal signé en 1987, qui visait à éliminer progressivement les substances appauvrissant l'ozone et à initier la transition vers des alternatives plus respectueuses de l'environnement [19].

Troisième génération (années 1990–présent) : Sensibilisation à l'environnement et HFC

En réponse à la disparition progressive des substances appauvrissantes dans la couche d'ozone, la troisième génération de fluides frigorigènes a introduit les hydrofluorocarbures (HFC) comme alternatives. Parmi les exemples courants figurent R-134a (tétrafluoroéthane), R-404A et R-410A. Ces fluides frigorigènes ne contiennent pas de chlore, ce qui les rend inoffensifs pour la couche d'ozone. Cependant, ils présentent un potentiel de réchauffement climatique élevé (PRG), contribuant significativement au changement climatique. Par exemple, R-134a a un PRG de 1 430, ce qui signifie qu'il retient 1 430 fois plus de chaleur que le CO_2 sur une période de 100 ans. À mesure que la sensibilisation environnementale grandissait, les efforts réglementaires se sont intensifiés — notamment par l'amendement Kigali au Protocole de Montréal (2016), qui a établi une feuille de route mondiale pour la réduction progressive des HFC afin d'atténuer leur impact climatique. Cela a marqué un tournant clé vers la durabilité dans le secteur de la réfrigération [19].

Quatrième génération (présent–futur) : faible PRG et alternatives naturelles

La quatrième génération de fluides frigorigènes se définit par un engagement fort envers la durabilité environnementale, avec un accent sur les substances ayant un potentiel d'appauvrissement de l'ozone (ODP) nul et un potentiel de réchauffement climatique faible ou ultra-faible (PRG). Un développement clé de cette phase est l'émergence des hydrofluoroléfines (HFO), telles que R-1234yf et R-1234ze, qui offrent des PRG inférieures à 1. Bien que les HFO soient moins stables chimiquement que leurs prédécesseurs, ils sont généralement sûrs lorsqu'ils sont bien gérés. Parallèlement, on observe une renaissance des fluides frigorigènes naturels comme l'ammoniac (NH_3), le dioxyde de carbone (CO_2) et les hydrocarbures, qui sont respectueux de l'environnement mais nécessitent une manipulation soigneuse et une conception avancée du système en raison de leur toxicité, inflammabilité ou haute pression de fonctionnement. De plus, des fluides frigorigènes mélangés — combinés de HFC et HFO — ont été développés pour trouver un équilibre entre performance, sécurité et impact environnemental. Cette génération reflète l'évolution de l'industrie de la réfrigération vers la responsabilité climatique à long terme et la conformité à l'évolution des réglementations mondiales [19].

L'avenir des fluides frigorigènes

L'avenir des fluides frigorigènes est façonné par trois grandes tendances. Premièrement, les réglementations environnementales accélèrent l'abandon des fluides frigorigènes à PRG, portées par des cadres tels que les règlements européens F-gas et la loi AIM des États-Unis. Deuxièmement, l'innovation technologique vise à améliorer l'efficacité du système, à réduire la charge et les fuites de fluides frigorigènes, et à faire progresser les systèmes de réfrigération intelligents optimisant la performance et la surveillance. Troisièmement, les principes de durabilité et d'économie circulaire gagnent en importance, mettant l'accent sur la récupération, le recyclage et la réutilisation des fluides frigorigènes, ainsi que les évaluations du cycle de vie et l'éco-conception des équipements de refroidissement. Parallèlement, les recherches explorent de toutes nouvelles classes de fluides frigorigènes, telles que les liquides ioniques et magnétiques, et étudient des cycles alternatifs de réfrigération, notamment l'absorption, le refroidissement thermoélectrique et magnétique. Ces avancées visent à réduire l'impact environnemental tout en répondant à la demande mondiale croissante de refroidissement. Dans l'ensemble, l'évolution des fluides frigorigènes reflète un équilibre dynamique entre progrès technologique et responsabilité environnementale. Des premières substances naturelles aux composés synthétiques, puis de retour aux solutions durables et à faible impact, le domaine continue d'évoluer face aux défis climatiques. Comprendre ces transitions est essentiel pour la prochaine génération d'ingénieurs et de scientifiques œuvrant au développement de technologies de refroidissement résilientes et respectueuses du climat.

3.3. Désignation et propriétés

Désignation

La nomenclature des fluides frigorigènes, en particulier pour les fluides frigorigènes halogénés (CFC, HCFC, HFC et HFO), suit un système standardisé développé par l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Ce système utilise le préfixe « R- » suivi d'un chiffre encodant la structure moléculaire du fluide frigorigène.

Format général : R-xyz

Où :

x = Nombre de doubles liaisons (pour les composés insaturés comme les HFO)
y = Nombre d'atomes de carbone moins 1
z = Nombre d'atomes d'hydrogène plus 1
w = Nombre d'atomes de fluor

Le nombre d'atomes de chlore est déterminé par les exigences de valence restantes. Ce système fonctionne pour les hydrocarbures entièrement halogénés et suit cette logique pour R-xyz :

R-(m−1)(n+1)p

Où :

m = nombre d'atomes de carbone
n = nombre d'atomes d'hydrogène
p = nombre d'atomes de fluor

Le reste de la valence est supposé être rempli par des atomes de chlore ou de brome (ou aucun).

Exemples

R-22 (HCFC-22)

Formule chimique : $CHClF_2$
Nombre d'atomes de carbone : 1 → (1 − 1) = 0
Nombre d'atomes d'hydrogène : 1 → (1 + 1) = 2
Nombre d'atomes de fluor : 2

→ Par conséquent : R-022 → simplifié en R-22

R-134A (HFC-134a)

Formule chimique : CH_2FCF_3
Nombre d'atomes de carbone : 2 → (2 − 1) = 1
Nombre d'atomes d'hydrogène : 2 → (2 + 1) = 3
Nombre d'atomes de fluor : 4

→ Donc : R-134

Le suffixe « a » désigne un isomère (une disposition structurelle différente des mêmes atomes).

R-1234yf (HFO-1234yf)

Composé insaturé (double liaison présente)
Le premier chiffre « 1 » signifie une double liaison
Le reste suit la même règle carbone-hydrogène-fluor
Le « yf » indique un isomère spécifique

Préfixes spéciaux

CFC : Chlorofluorocarbone (sans hydrogène)

HCFC : Hydrochlorofluorocarbone (contient de l'hydrogène)
HFC : Hydrofluorocarbure (sans chlore)
HFO : Hydrofluoroolefine (contient des doubles liaisons)
Série R-600 : Hydrocarbures (par exemple, R-600a = isobutane)

Mélanges et mélanges

Mélanges zéotropiques : Étiquetés R-4xx (par exemple, R-404A)
Mélanges azéotropiques : Étiquetés R-5xx (par exemple, R-507)
Le suffixe A, B, C indique des variations de composition

Propriétés : Aperçu

Propriétés thermodynamiques et de transport appropriées

1. Températures au point critique et au point d'ébullition adaptées à l'application
2. Chaleur latente élevée de vaporisation
3. Faible viscosité
4. Conductivité thermique élevée
5. Non inflammable et non toxique
6. Stable chimiquement et thermiquement, inerte
7. Compatibilité avec les matériaux, complexité avec les lubrifiants

Autres

1. Solubilité/miscibilité satisfaisante en huile
2. Haute résistance diélectrique de la vapeur
3. Point de congélation bas
4. Détection facile des fuites
5. Faible coût

Propriétés : Thermodynamique et opérationnelle

Point d'ébullition : La température la plus basse lors du changement de phase (entrée d'évaporateur) doit être au-dessus de celle-ci pour ne pas fonctionner en dessous de 1 atm (en cas de fuite, l'humidité pénètre dans l'installation)

Point critique : Plus le point critique est élevé, plus la baisse d'efficacité dans des conditions ambiantes plus élevées (condensation) est faible

Rapport de compression : Ce paramètre (Pdisc/Psuc) définit le fonctionnement du compresseur et, par conséquent, les efficacités. Plus c'est faible, mieux c'est

Pression de décharge : Une pression de décharge plus faible permet d'obtenir des composants plus légers et moins coûteux

Température de refoulement : En général, la température de refoulement des systèmes de réfrigération doit être inférieure à 105 °C en fonctionnement normal et atteindre un pic de 120 °C.

Pour être un remplaçant, il faut avoir une relation P-T similaire (Fig. 22)

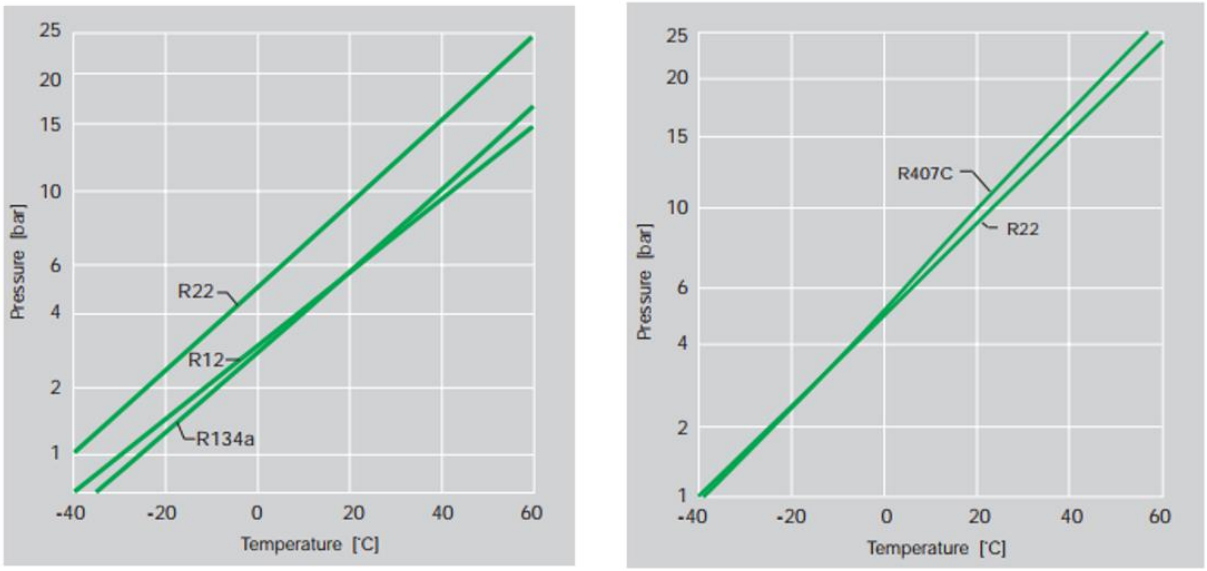


Fig. 22. Comparaison de la pression et de la température entre fluides frigorigènes [23].

Propriétés : Performance

Chaleur latente de vaporisation : Permet à un volume balayé plus faible du compresseur d'atteindre la même capacité de refroidissement.

Indice isentropique de compression : aussi faible que possible afin que la hausse de température pendant la compression soit faible

Chaleur spécifique au liquide : Petite de sorte que le degré de sous-refroidissement sera important, entraînant une quantité moindre de gaz flash à l'entrée de l'évaporateur

Chaleur spécifique à la vapeur : Est grande de sorte que le degré de surchauffe sera faible

Conductivité thermique : En phase liquide comme en phase vapeur, elle doit être élevée pour des coefficients de transfert de chaleur plus élevés

Viscosité : Faible en phase liquide et vapeur pour des chutes de pression par friction plus faibles

Règle générale : la valeur optimale de la chaleur spécifique à la vapeur molaire se situe entre 40 et 100 kJ/mol.K.

Avantages : Techniques

Stabilité chimique : propriété de base, donc tous les fluides frigorigènes courants doivent présenter cette caractéristique.

Coût/disponibilité : Cette caractéristique influence considérablement la décision des fluides frigorigènes, plus que jamais.

Compatibilité :

1. Avec les métaux, pour les composants et les tuyaux (l'ammoniac et le dioxyde de carbone posent problème)
2. Avec l'huile lubrifiante, il existe des différences importantes entre les générations et les types de fluides frigorigènes
3. Avec les élastomères et les plastiques, l'une des exigences à vérifier avant la décision concerne le cas d'un nouveau fluide frigorigène

Propriétés : Sécurité

La nomenclature est définie par l'ASHRAE 34 (International), puis l'EN378 (Europe), et dépend ensuite du pays (Tableau 4).

Cette classification influence la quantité maximale de charge de fluide frigorigène pour chaque application de réfrigération.

	Toxicité faible	Toxicité élevée
Inflammabilité élevée	A3	B3
Inflammabilité faible	A2	B2
	A2L	B2L
Aucune propagation de flamme	A1	B1

Tableau 4. Nomenclature de sécurité [24].

R : La toxicité n'a pas été identifiée à des concentrations ≤ 400 ppm par volume.

3.4. Résumé des métriques environnementales (Fig. 23)

1. ODP : Mesure la décomposition de l'ozone stratosphérique par rapport à R-11.
2. PRG : Mesure l'impact relatif d'un fluide frigorigène sur la chaleur par rapport au CO_2 sur une période donnée.
3. TEWI : Évalue l'effet combiné de réchauffement des fuites de fluide frigorigène et de la consommation d'énergie, mais n'inclut pas la fabrication.
4. LCCP : Prend en compte l'impact climatique total sur l'ensemble du cycle de vie d'un fluide frigorigène, y compris la production, l'utilisation et l'élimination.
5. LCA : Évalue globalement les impacts environnementaux dans plusieurs catégories tout au long de la vie d'un produit.

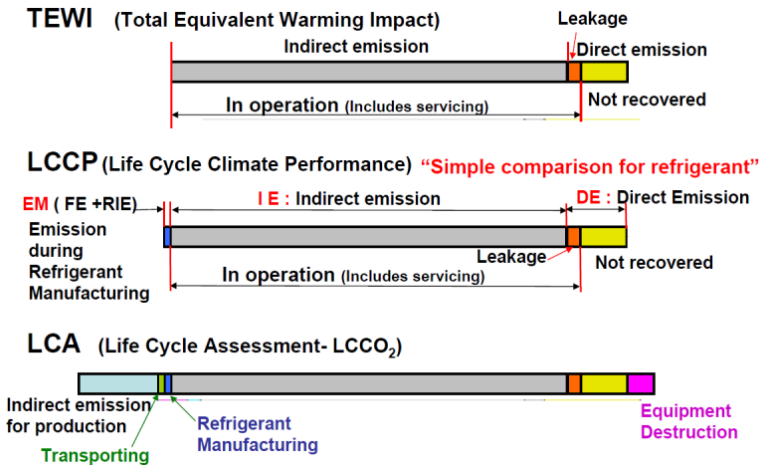


Fig. 23. Représentation graphique des émissions équivalentes CO2 [25].

PRG

Le potentiel de réchauffement climatique (PRG) mesure l'impact relatif d'un gaz à effet de serre en termes de sa capacité de retenir la chaleur sur une période donnée, typiquement 20, 100 ou 500 ans (exemple Fig. 24), comparé au dioxyde de carbone (CO_2), qui a un PRG de 1 par définition. PRG prend

en compte la quantité d'énergie qu'un gaz absorbe, sa durée de vie atmosphérique et sa concentration dans le temps. Le PRG d'une substance sur une période t est donné par l'Équation (4) [19] :

$$PRG_{gaz,t} = \frac{\int_0^T a_{gaz} \cdot C_{gaz}(t)dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot C_{CO_2}(t)dt} \quad (4)$$

où :

a_{gaz} : Efficacité radiative du gaz (combien de chaleur il retient par unité de masse).

C_{Gaz} (t) : Concentration du gaz dans l'atmosphère au fil du temps.

T: Horizon temporel (typiquement 20, 100 ou 500 ans).

a_{CO_2} : Efficacité radiative du CO_2.

C_{CO_2} (t) : Concentration de CO_2 au fil du temps.

Le PRG nous informe dans quelle mesure une masse donnée d'un fluide frigorigène (ou d'autres gaz à effet de serre) contribue au réchauffement climatique par rapport à la même masse de CO_2.

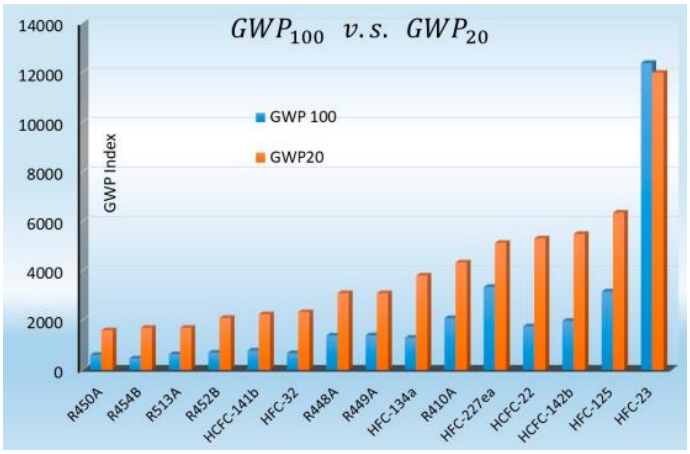


Fig. 24. PRG100 (GWP100) comparé à PRG20 (GWP20) [26].

L'impact total équivalent du réchauffement (TEWI) (exemple Fig. 25) estime l'impact global sur le réchauffement climatique d'un système de réfrigération ou de climatisation durant ses phases d'utilisation et d'élimination. Le TEWI prend en compte à la fois les émissions directes et indirectes. La formule du TEWI est donnée par : TEWI = Émissions Directes + Émissions Indirectes.

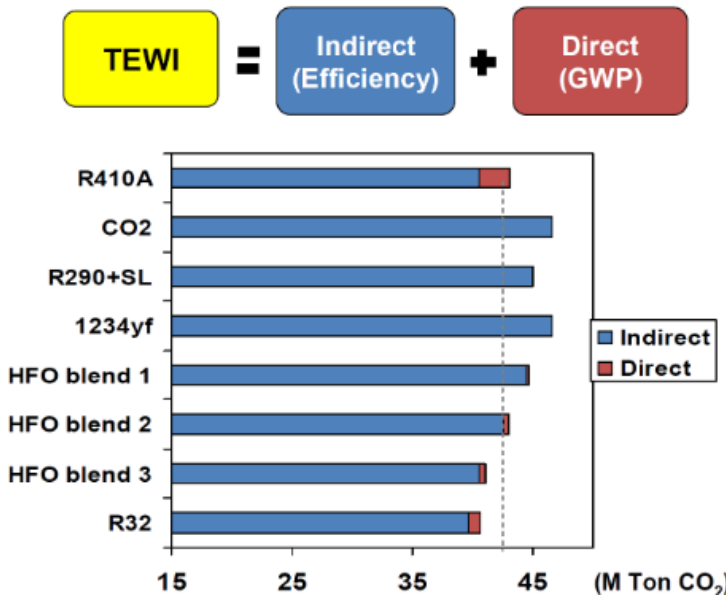


Fig. 25. TEWI comparatif entre les fluides frigorigènes généralement utilisés dans les pompes à chaleur [27].

TEWI [19]

1) Émissions directes : fuite accidentelle de fluide frigorigène et pertes lors des phases d'exploitation, de maintenance et d'élimination en fin de vie. Elle est calculée comme suit :

Émissions directes = Taux de fuite × charge ×PRG + Émissions en fin de vie × Charge × PRG

Taux de fuite : pourcentage annuel de fuite du fluide frigorigène.

Charge : Charge totale du fluide frigorigène (masse de fluide frigorigène dans le système).

Émissions en fin de vie : pourcentage de fluide frigorigène perdu ou non récupéré à l'élimination.

2) Émissions indirectes : Émissions équivalentes CO_2 résultant de la consommation d'énergie du système sur toute sa durée de vie. Elle est calculée comme suit :

Émissions indirectes = Consommation annuelle d'énergie × durée de vie × facteur d'émission

Consommation annuelle d'énergie : l'énergie consommée par le système en un an.

Durée de vie : durée de vie prévue du système.

Facteur d'émission : Émissions de CO_2 par unité d'énergie consommée, selon le mix de production d'électricité.

LCCP

La performance climatique du cycle de vie (LCCP) évalue l'impact climatique total d'un fluide frigorigène tout au long de son cycle de vie, tenant compte à la fois des émissions directes et indirectes. Les émissions directes surviennent lorsque le fluide frigorigène est libéré (par fuites ou élimination), tandis que les émissions indirectes proviennent de l'énergie nécessaire au fonctionnement des équipements fluides frigorigènes [19]. La formule générale pour le LCCP est la suivante :

$LCCP = E_{direct} + E_{indirect} + E_{fabrication} + E_{fin\ de\ vie}$

E_{direct} : Émissions directes issues des fuites ou des rejets de fluides frigorigènes pendant l'exploitation et l'entretien :

E_{direct} = PRG × quantité de fuites

$E_{Indirect}$: Émissions indirectes de l'énergie utilisée par le système :

$E_{Indirect}$ = Consommation totale d'énergie × facteur d'émission de la source d'énergie

$E_{-fabrication}$: Émissions issues de la production et du transport de fluides frigorigènes.

$E_{Fin\ de\ vie}$: Émissions issues de l'élimination ou de la récupération à la fin de la durée de vie du système.

ACV

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une évaluation systématique des impacts environnementaux associés à toutes les étapes du cycle de vie d'un produit, de l'extraction des matières premières, la production, l'utilisation et l'élimination. Contrairement à la LCCP, l'ACV couvre diverses catégories d'impact au-delà du changement climatique, telles que l'épuisement des ressources, l'acidification et l'eutrophisation [19].

L'impact sur le cycle de vie d'un fluide frigorigène ou d'un système peut être calculé avec l'équation (5) :

$$ACV_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n} Inventaire_i \times \text{Facteur d'impact}_i \qquad (5)$$

Inventaires : Quantité de chaque facteur environnemental (par exemple, émissions de CO_2, consommation d'eau, consommation d'énergie) à chaque étape du cycle de vie.

Facteur d'impact : Coefficient représentant l'impact environnemental par unité de chaque facteur.

Les résultats de l'ACV sont généralement présentés dans plusieurs catégories (Fig. 26), telles que :

Potentiel de réchauffement climatique (PRG) (kg équivalent CO_2).

Potentiel d'appauvrissement de l'ozone (ODP) (kg équivalent CFC-11).

Le potentiel d'acidification (AP), qui mesure le potentiel de pluie acide (kg SO_2 équivalent).

Le potentiel d'eutrophisation (EP), qui évalue l'enrichissement des nutriments menant à la pollution de l'eau (kg PO_4^{3-} équivalent).

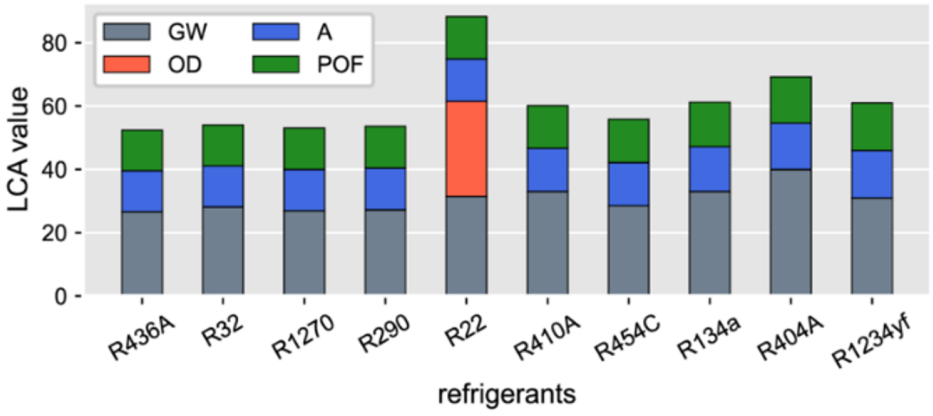


Fig. 26. Valeurs de LCA pour les fluides frigorigènes étudiés : GW : réchauffement climatique, A : acidification, OD : appauvrissement de la couche d'ozone, POF : formation photochimique d'ozone [28].

Réglementation des HFC - À l'échelle mondiale

2016 - Amendement de Kigali au Protocole de Montréal : réduire progressivement les HFC pourrait réduire le réchauffement climatique de 0,5 °C d'ici 2100 (Fig. 27) [29].

Le Protocole de Montréal engage les pays, y compris les membres de l'UE, à réduire la consommation de HFC. L'UE met en œuvre cet engagement par le biais de règlements internes, tels que le Règlement 517/2014. Les pays développés aideront financièrement et techniquement les pays en développement [30].

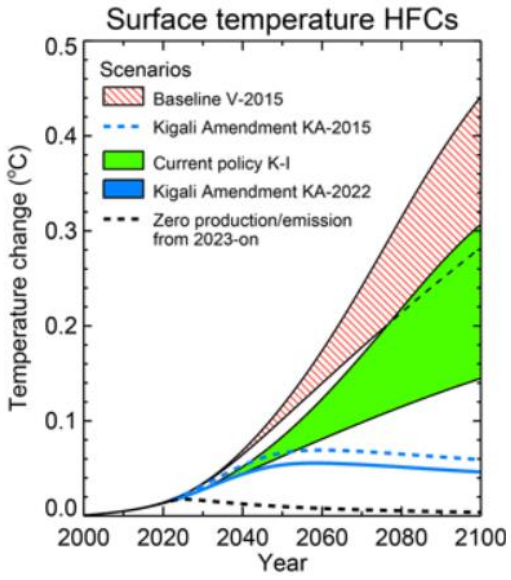


Fig. 27. Changement de température réduisant l'utilisation des HFC [31].

Réglementation des HFC - Europe

Règlement (UE) n° 517/2014 (Règlement F-Gaz) [32]

Ce règlement constitue le principal cadre régissant l'utilisation et la réduction des gaz fluorés dans l'UE, remplaçant le Règlement (CE) n° 842/2006. Ses principaux objectifs incluent :

1. Réduction progressive : Elle établit une réduction progressive des HFC disponibles sur le marché européen. D'ici 2030, une réduction de 79 % des HFC par rapport aux niveaux de 2015 est attendue.
2. Restrictions d'utilisation : Il limite l'utilisation des HFC dans les nouveaux équipements, y compris les systèmes de réfrigération et de climatisation, et interdit leur utilisation dans certaines applications où des alternatives existent.
3. Entretien et contrôle des fuites : Il exige que les opérateurs effectuent des contrôles réguliers de fuites, en particulier dans les systèmes à forte teneur en gaz fluorés.
4. Exigences de récupération : Il impose la récupération des gaz à la fin de la durée de vie de l'équipement.

Règlement (UE) n° 2024/573 (Règlement F-Gaz) [33]

Mesures antérieures améliorées, augmentées et étendues, notamment :

1. Système de quotas pour les HFC, au-delà de 2030 et à être supprimé d'ici 2050.
2. Restrictions sur l'utilisation et l'élimination des gaz fluorés.
3. Établit des règles plus strictes pour prévenir les émissions.

4. Facilite une plus grande automatisation du contrôle pour surveiller le commerce des gaz fluorés.
5. Étiquetage des équipements.

Fluides frigorigènes actuels

Actuellement, deux options sont envisagées :

1. Fluides frigorigènes synthétiques, y compris HFO et mélanges de HFC avec HFC
2. Fluides frigorigènes naturels

Ils sont significativement différents, donc le fluide frigorigène choisi doit tenir compte de plusieurs exigences.

HFO

Avantages des HFO

1. PRG faible : Les HFO, comme le R-1234yf et le R-1234ze, ont un PRG beaucoup plus faible (moins de 1), ce qui en fait une option plus respectueuse du climat comparée aux HFC.
2. Stabilité thermique et chimique : Les HFO sont stables à des températures et pressions typiques de fonctionnement des systèmes de réfrigération, mais se dégradent plus rapidement dans l'atmosphère, réduisant leur persistance à long terme.
3. Faible toxicité : De nombreux HFO ont une faible toxicité et ne contiennent pas de chlore, ce qui les rend plus sûrs pour la couche d'ozone en cas de fuite.
4. Inflammabilité plus faible : Comparée aux hydrocarbures, leur inflammabilité est faible.
5. Pressions plus basses : Comparé au CO2, la pression de fonctionnement est réduite.
6. Combinaison plus facile avec les HFC : ce qui permet des remplacements directs (directs) des HFC pour l'entretien.
7. Mélanges HFC/HFO.

Caractéristiques requises : Les HFC offrent souvent une meilleure efficacité, un transfert de chaleur et une inflammabilité moindre, ce qui est essentiel dans de nombreuses applications de réfrigération. Les HFO, en revanche, offrent un PRG plus faible mais peuvent avoir une inflammabilité légèrement supérieure ou un rendement inférieur aux HFC.

Environnement : La raison principale du développement des mélanges HFC/HFO est de réduire le PRG tout en maintenant l'efficacité thermodynamique et les caractéristiques opérationnelles des fluides frigorigènes traditionnels. Le PRG du mélange est souvent calculé pour garantir le respect des normes réglementaires.

Inflammabilité : Cela peut être atténué en ajustant le rapport de mélange ou en utilisant des composants ignifuges.

Efficacité et performances : Obtenir un mélange offrant une efficacité et des performances de refroidissement similaires ou supérieures à celles du HFC qu'il remplace est un défi.

Propriétés thermodynamiques : Le fluide frigorigène doit avoir des performances thermiques similaires ou supérieures (ex., capacité thermique, pression, variations d'enthalpie) que les fluides frigorigènes qu'il remplace.

Compatibilité lubrifiante : Le mélange doit être compatible avec les lubrifiants utilisés dans les systèmes existants afin d'assurer les performances à long terme et la fiabilité du système.

Préoccupations concernant les HFO

1. TFA

2. PFAS
3. Règlement européen interdisant les gaz fluorés
4. Nettoyage écologique
5. Pression des gouvernements
6. Évolution des coûts et des quotas
7. Naturel vs. Synthétique

TFA

L'acide trifluoroacétique (TFA), un composé organofluoré avec la formule CF_3CO_2H, est un produit de dégradation notable formé dans l'atmosphère à partir de la dégradation de certains fluides frigorigènes. Selon un rapport de l'Agence fédérale allemande de l'environnement, environ 5 % des TFA détectés dans l'environnement proviennent d'activités humaines, notamment la fabrication, l'agriculture, le traitement des eaux usées et les émissions de fluides frigorigènes. Parmi les fluides frigorigènes, R-1234yf se dégrade complètement en TFA (100 %), tandis que R-134a contribue entre 7 % et 20 %. D'autres fluides frigorigènes présentent une production de TFA plus faible : R-1234ze(E) génère moins de 10 %, R-1336mzz(Z) moins de 20 %, et R-1233zd(E) seulement environ 2 %. Comprendre la formation des TFA est important en raison de sa persistance environnementale et des impacts écologiques potentiels associés à l'utilisation croissante de fluides frigorigènes fluorés [34].

PFAS

Substances alkyliques perfluorées et polyfluorées (PFAS) : Les PFAS constituent un grand groupe de plus de 4 700 substances chimiques synthétiques « permanentes » connues pour leur persistance dans l'environnement et leurs potentiels dommages à la santé humaine. Cette famille comprend divers gaz fluorés utilisés dans les applications CVC et R, telles que certains HFC (par exemple, R-134a, R-125, R-143a et R-152a) et HFO (par exemple, R-1234yf, R-1234ze(E) et R-1233zd(E)). Notamment, l'acide trifluoroacétique (TFA), un produit de dégradation de certains fluides frigorigènes, est également classé comme PFAS en raison de ses groupes chimiques CF_3 et CF_2. En réponse aux préoccupations croissantes, l'État du Maine aux États-Unis deviendra le premier gouvernement à interdire la vente de produits contenant des PFAS à partir du 1er janvier 2030. Pour des informations plus détaillées, consulter le rapport de l'Agence norvégienne de l'environnement [35].

Fluides frigorigènes naturels

Les fluides frigorigènes naturels sont de plus en plus considérés comme des alternatives plus sûres et durables aux HFO. Contrairement à de nombreux fluides frigorigènes synthétiques, les fluides frigorigènes naturels ne produisent pas de sous-produits nocifs tels que l'acide trifluoroacétique (TFA) ou le fluorure d'hydrogène (HF) lors de la dégradation atmosphérique. Ils ont également un potentiel d'appauvrissement de l'ozone (ODP) nul et des potentiels de réchauffement climatique (PRG) significativement plus faibles. Les fluides frigorigènes naturels les plus couramment utilisés incluent le dioxyde de carbone (CO_2), l'ammoniac (NH_3) et les hydrocarbures.

Dioxyde de carbone (CO_2) :

Le dioxyde de carbone (CO_2) a un potentiel de réchauffement climatique (PRG) de 1, ce qui en fait un excellent fluide frigorigène écologique avec un impact climatique minimal. Il est non toxique et non inflammable, garantissant la sécurité dans des conditions normales de fonctionnement. Les systèmes CO_2 fonctionnent efficacement, surtout dans les applications à basse température, mais ils nécessitent des pressions de fonctionnement plus élevées, ce qui peut augmenter les coûts et la complexité des équipements. Un défi majeur est que l'efficacité du CO_2 diminue à des températures ambiantes plus élevées, limitant son adéquation à de telles conditions à moins que des modifications importantes du système ne soient mises en œuvre.

Ammoniac (NH_3) :

L'ammoniac est un fluide frigorigène naturel avec un potentiel de réchauffement climatique (PRG) nul, ce qui signifie qu'il ne contribue pas au réchauffement climatique. Il offre une grande efficacité thermodynamique, ce qui le rend particulièrement adapté aux systèmes industriels de réfrigération à grande échelle. Cependant, le principal inconvénient de l'ammoniac est sa toxicité, qui pose d'importantes préoccupations de sécurité en cas de fuite, bien qu'il soit non inflammable. Cela nécessite une manipulation soigneuse, des protocoles de sécurité robustes et des systèmes avancés de détection de fuites. Malgré ces défis, l'ammoniac est largement reconnu comme un fluide frigorigène durable et reste largement utilisé dans les applications industrielles.

Hydrocarbures (HC) (ex, propane (R-290), butane (R-600a)) :

Les hydrocarbures ont un potentiel de réchauffement climatique (PRG) très faible d'environ 3, ce qui en fait une alternative économique et respectueuse de l'environnement aux HFC et HFO. Leur principal inconvénient est l'inflammabilité, qui nécessite une conception minutieuse du système, des mesures de sécurité strictes et une détection efficace des fuites pour réduire les risques. Les hydrocarbures conviennent parfaitement aux applications à basse à moyenne température, telles que la réfrigération domestique et les petits systèmes commerciaux. Ils offrent également une grande efficacité thermodynamique, ce qui en fait une alternative solide pour de nombreuses applications de refroidissement résidentiel et à petite échelle.

Les fluides frigorigènes naturels comme alternatives

Avantages

1. Aucun sous-produit nocif : Les fluides frigorigènes naturels ne se décomposent pas en composés nocifs comme les TFA ou les HF.
2. Durabilité : Ils ont un PRG très faible voire nul et un ODP nul.
3. Efficacité : En particulier l'ammoniac et le CO_2, offrent une performance et une efficacité thermodynamiques élevées.
4. Disponibilité et rapport qualité-prix : Ils sont abondants et relativement peu coûteux, ce qui en fait des alternatives rentables aux fluides frigorigènes synthétiques.

Défis

1. Modifications du système : Le passage aux fluides frigorigènes naturels peut nécessiter des modifications des systèmes existants (nouveau système de compression de vapeur)

2. Considérations de sécurité : L'inflammabilité des hydrocarbures et la toxicité de l'ammoniac nécessitent une manipulation et des mesures de sécurité attentives. Cela peut augmenter les coûts et la complexité du système.

3. Infrastructures et formation : Manipuler les fluides frigorigènes naturels en toute sécurité, ce qui peut poser des défis pour une adoption généralisée.

3.5. Avenir des fluides frigorigènes

Résumé

Comme expliqué dans la section précédente, la tendance future des fluides frigorigènes devrait se concentrer sur la durabilité et la réduction de l'impact environnemental.

1. Fluides frigorigènes à faible potentiel de réchauffement climatique (PRG) : La transition vers des fluides frigorigènes à faible ou presque zéro PRG et sans générer de sous-produits nocifs, tels que les fluides frigorigènes naturels (CO2, ammoniac, hydrocarbures), sera une tendance majeure en raison de réglementations plus strictes.

2. Fluides frigorigènes A2L et A3 : L'utilisation de fluides frigorigènes légèrement inflammables (A2L) et plus inflammables (A3) comme R-32, R-290 et R-1234ze(E) seront accrus, en raison de leur BPC plus faible et de leur efficacité, bien que la sécurité de la manipulation soit un défi.
3. Efficacité énergétique : Les fluides frigorigènes qui améliorent l'efficacité énergétique des systèmes de refroidissement seront priorisés, à mesure que la réglementation sur la consommation d'énergie devient plus stricte afin de réduire l'empreinte carbone globale.
4. Fluides frigorigènes synthétiques et mélangés : Développement continu de nouveaux mélanges qui équilibrent la réduction du PRG, l'efficacité énergétique et la sécurité, tout en répondant aux besoins de l'industrie dans diverses applications.
5. Réglementations et accords mondiaux : Les accords mondiaux, tels que l'amendement de Kigali au Protocole de Montréal, entraîneront l'élimination progressive des substances à haut PRG comme les HFC, ce qui entraînera un passage aux fluides frigorigènes alternatifs.

Considérations finales pour les machines connectées au RCF

Quel fluide frigorigène doit être chargé dans ma machine de refroidissement/chauffage ? Vous devez y réfléchir

1. Température pour produire le chauffage ou la climatisation (RCU, RFU, procédé industriel, eau chaude, etc.)
2. Température de dissipation/absorption du chauffage (ambiant, géothermique, RCU, RFU, chaleur fatale, etc.)
3. Taille de la machine (capacité de refroidissement/chauffage)
4. Emplacement de la machine
5. Réglementations locales actuelles
6. Soyez informé des futures réglementations ou quotas
7. Coût de la machine et du fluide frigorigène
8. Réglementations de sécurité
9. Consultez toujours des experts ou des distributeurs locaux

3.6. Conclusions

L'histoire des fluides frigorigènes fournit des informations essentielles sur les normes et exigences actuelles. Depuis la commercialisation des technologies de réfrigération et de pompes à chaleur, des efforts importants se sont concentrés sur l'identification des fluides frigorigènes les plus durables. Bien qu'un fluide frigorigène optimal existe pour chaque application, aucun fluide frigorigène parfait ne répond simultanément à tous les critères. Ainsi, un compromis est toujours nécessaire, équilibrant performance thermodynamique, faisabilité technique, sécurité, facteurs économiques et impact environnemental. Les fluides frigorigènes alternatifs pour les systèmes existants (à installation directe ou à réfection) diffèrent de ceux destinés aux nouvelles installations, qui peuvent avoir des exigences spécifiques en matière de sécurité ou d'exploitation. En regardant vers l'avenir, la tendance privilégie les fluides frigorigènes naturels pour répondre globalement aux préoccupations environnementales. De plus, des technologies comme les réseaux de chauffage urbain (RCU) et les réseaux de refroidissement urbain (RFU) peuvent faciliter le transfert de chaleur et permettre l'utilisation de fluides frigorigènes avec des exigences de sécurité plus strictes en permettant la conception de grands systèmes de compression de vapeur isolés.

4. Aspects économiques et environnementaux

4.1. Introduction

Les réseaux de froid urbain (RCU) offrent une alternative aux climatiseurs (multi-split), pompes à chaleur réversibles, refroidisseurs et systèmes de fluides frigorigènes à débit variable (VRF). Contrairement à ce système décentralisé où chaque appartement, étage ou zone de confort d'un

bâtiment possède sa propre unité, les RFU centralisent la production de refroidissement pour tout un quartier ou un groupe de bâtiments.

Cette approche centralisée améliore l'efficacité énergétique, réduit les coûts des équipements et améliore la durabilité, tout en maintenant le même niveau de confort intérieur.

Cependant, la mise en œuvre d'un RFU nécessite un investissement substantiel dans les infrastructures de distribution, notamment dans la construction de pipelines de refroidissement. La viabilité économique de ces systèmes dépend de plusieurs facteurs clés, notamment la densité de la demande, les conditions réglementaires et le soutien politique.

Les RFU partagent de nombreux avantages et limitations des réseaux de chauffage urbain. Néanmoins, les systèmes de refroidissement fonctionnent généralement avec des exigences de température plus uniformes. En revanche, les sources de refroidissement résiduel sont rares, sauf lorsqu'on utilise des pompes à chaleur capables de chauffer et de refroidir simultanément.

Ce chapitre explore les principaux facteurs influençant la faisabilité économique et la durabilité des RFU, y compris des considérations juridiques, réglementaires et politiques.

4.2. Densité de la demande

Densité de la demande de refroidissement pour les RFU

La densité de la demande de refroidissement fait référence à l'énergie thermique nécessaire pour le refroidissement par unité de surface dans une zone spécifique. C'est un paramètre critique pour évaluer la faisabilité technique et économique d'un système de réseau de froid urbain (RFU). Plus la densité de demande de refroidissement est élevée, plus le RFU sera financièrement réalisable comparé à d'autres systèmes de refroidissement individuels ou distribués.

La densité de la demande de refroidissement sera plus élevée dans les zones très peuplées (villes plutôt que quartiers résidentiels de banlieue) et dans les climats plus chauds, ou les zones à forte consommation de refroidissement comme les centres de données.

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte dans l'étude de la densité de la demande de refroidissement :

1. Évaluation de la faisabilité : Les zones à forte densité de demande de refroidissement sont plus adaptées aux systèmes RFU en raison des coûts de distribution par unité d'énergie livrée plus faibles.
2. Optimisation du réseau : Elle contribue à la bonne dimension des composants du système tels que les canalisations, les stations d'échange thermique et les centrales de refroidissement.
3. Durabilité : Les zones à haute densité permettent une distribution efficace de l'énergie, réduisant l'impact environnemental et favorisant la durabilité.

Utilisateurs de refroidissement

La demande de refroidissement provient généralement de

1. Zones urbaines : Pour le confort thermique, utilisé dans les systèmes de climatisation, pour les ventilo-convecteurs, les plafonds rayonnants ou les grands systèmes en remplacement des refroidisseurs. Inclut des applications domestiques mais aussi des bureaux, commerces, bâtiments publics, etc. Plage de température similaire.
2. Procédés industriels : Dans ce cas, la plage de température est large car elle inclut tous les procédés qui doivent refroidir le procédé fabriqué ou manipulé.
3. Centres de données : Ils sont présents dans les villes et les zones industrielles. Chaque fois plus représentatifs.

Facteurs de demande de refroidissement

Facteurs influençant la densité de la demande de refroidissement :

1. Caractéristiques urbaines : Les immeubles de grande hauteur et les zones urbaines densément peuplées présentent souvent une densité de demande de refroidissement plus élevée.
2. Climat : Les climats plus chauds augmentent la demande de refroidissement, rendant les systèmes RFU plus attractifs.
3. Utilisation du bâtiment : Les zones commerciales et industrielles nécessitent généralement plus de refroidissement que les zones résidentielles.

Analyse de la demande de densité

Une analyse détaillée de la demande de refroidissement est fondamentale pour concevoir un système de réseau de refroidissement urbain (RFU) efficace et rentable. Les étapes suivantes doivent être prises en compte :

1. Collecte et prétraitement des données

Données sur les bâtiments : Collecter des données détaillées sur les types de bâtiments, l'utilisation (résidentielle, commerciale, industrielle), les tailles et les taux d'occupation, et inclure des données historiques sur la demande de refroidissement (si disponibles).
Données climatiques : Utiliser des ensembles de données météorologiques pour prendre en compte la température locale, l'humidité et le rayonnement solaire, qui influencent les besoins en refroidissement.
Schémas de consommation d'énergie : Analyser les profils énergétiques pour comprendre la demande de refroidissement en période de pointe et en dehors des heures de pointe.

2. Estimation de la charge de refroidissement

Simulation dynamique : Utiliser des outils de simulation énergétique (par exemple, TRNSYS, EnergyPlus) pour calculer les charges de refroidissement horaires pour chaque bâtiment en fonction des propriétés de l'enveloppe, des systèmes CVC et des charges internes.
Identification de la charge de pointe : Identifier les charges de refroidissement maximales, car elles influencent la taille des centrales et des réseaux de distribution.

3. Cartographie de la demande

Systèmes d'information géographique (SIG) : cartographier spatialement la demande de refroidissement pour visualiser les zones à forte demande et évaluer la faisabilité des réseaux de réseau. Superposer les données sur la disponibilité des infrastructures (routes, services publics, etc.).
Zonage : Diviser la zone de service en zones selon la densité de la demande et prioriser les zones à fort potentiel.

4. Profils de demande et diversité de charge

Analyse temporelle : Développer des profils de demande de refroidissement horaire, quotidien et saisonnier pour tenir compte des fluctuations. Utiliser des facteurs de diversité pour tenir compte de la non-coïncidence des pics de demande entre les bâtiments.
Facteurs de charge simultanés : Évaluer le fonctionnement simultané des bâtiments afin de réduire les besoins en capacité de l'installation.

5. Projections de croissance de la demande

Tendances du développement urbain : Intégrer des plans de croissance futurs pour les zones résidentielles, commerciales et industrielles.
Améliorations de l'efficacité énergétique : Prendre en compte l'évolution des codes du bâtiment et les efforts de rénovation qui pourraient réduire les charges de refroidissement.

6. Analyse de faisabilité

Densité de seuil : Assurez-vous que la densité de demande de refroidissement dépasse les seuils (par exemple, 30-50 MWh/ha/an) pour la viabilité économique.
Analyse coûts-bénéfices : Évaluez les compromis entre investissements dans les infrastructures et coûts opérationnels par rapport aux systèmes de refroidissement centralisés et individuels.

7. Intégration et optimisation des systèmes

Analyse côté source : Évaluer le potentiel d'intégration de sources renouvelables, de refroidisseurs à absorption thermiques fatales ou de systèmes de chauffage et d'énergie combinée (CHP) pour le refroidissement.
Pertes réseau : Analyser et minimiser les pertes thermiques et hydrauliques dans le système de distribution.
Flexibilité : Concevoir des systèmes évolutifs et modulaires pour s'adapter aux exigences futures variables.

4.3. Viabilité du refroidissement urbain par rapport à d'autres technologies

Caractéristiques générales

Le refroidissement urbain présente deux différences significatives par rapport aux systèmes distribués.

1. Premièrement, le réseau de canalisations qui fait circuler l'eau froide de l'installation centrale vers les bâtiments est un coût supplémentaire.
2. Deuxièmement, le refroidissement urbain consomme de l'eau. La quantité d'eau consommée est relativement faible en raison du fonctionnement en boucle fermée.

En compensant les coûts du réseau, le refroidissement urbain offre trois avantages principaux :

1. Faible demande en énergie.
2. Utilisation efficace de la capacité grâce à la diversité des charges et à la flexibilité dans la conception et l'installation de la capacité.
3. Potentiel d'économie pendant la période de pointe. Le RFU peut stocker jusqu'à 30 % de la production potentielle en retenant de l'eau refroidie dans des réservoirs.

Les systèmes de réseau de refroidissement urbain (RFU) présentent des avantages économiques et des défis distincts par rapport aux solutions de refroidissement conventionnelles (tableau 5).

1. Investissement en capital	
RFU	**CONVENTIONNEL**
Coûts initiaux élevés : Les systèmes RFU nécessitent un investissement initial important pour les centrales centralisées, les réseaux de pipelines et les infrastructures de connexion. Les économies d'échelle peuvent justifier ces coûts dans les zones à forte densité de demande de	Les climatiseurs autonomes ou les refroidisseurs sur toits ont des coûts initiaux plus faibles puisque chaque unité est installée et exploitée indépendamment. Cependant, ces systèmes dupliquent les équipements entre les bâtiments,

refroidissement, car les coûts fixes sont répartis sur une base d'utilisateurs plus large.	ce qui entraîne des inefficacités dans le déploiement des capitaux.
2. Coûts opérationnels	
Les opérations centralisées entraînent des coûts énergétiques plus faibles grâce à l'utilisation de refroidisseurs à haute efficacité, au partage optimisé de la charge et à la possibilité d'utiliser l'électricité hors pointe pour le stockage thermique. Les coûts de maintenance sont également plus faibles par unité de refroidissement car un seul système dessert plusieurs utilisateurs.	Les systèmes décentralisés consomment souvent plus d'énergie en raison de refroidisseurs plus petits et moins efficaces et d'un manque de diversité de charge. La maintenance est plus coûteuse car chaque unité nécessite un entretien individuel.
3. Rentabilité dans le temps	
RFU	**CONVENTIONNEL**
Les économies à long terme peuvent compenser l'investissement initial grâce à des factures d'énergie réduites, des coûts d'entretien moindres et des économies d'échelle. Ces systèmes sont particulièrement rentables dans les régions où la demande de refroidissement est élevée et les prix de l'énergie stables.	Bien que moins cher au départ, le coût total de possession augmente avec le temps en raison des coûts opérationnels et d'entretien plus élevés.
4. Potentiel de revenus	
Les fournisseurs RFU peuvent générer des sources de revenus stables grâce à des contrats à long terme avec les clients, garantissant des flux de trésorerie prévisibles. Vendre une capacité de refroidissement excédentaire ou s'intégrer à des systèmes d'énergie renouvelable peut créer des opportunités de revenus supplémentaires.	Il n'existe pas de modèle de revenus centralisé, car les systèmes individuels ne génèrent pas de revenus au-delà de leur fonctionnement.
5. Risque et flexibilité financière	
RFU	**CONVENTIONNEL**
Le risque financier est plus élevé lors de la phase initiale en raison des investissements importants et de la dépendance à la densité de la demande. Une fois opérationnels, les systèmes RFU bénéficient de flux de trésorerie prévisibles et d'une volatilité du marché moindre.	Risque financier initial moindre mais plus d'exposition aux fluctuations des prix de l'énergie et aux coûts d'entretien au fil du temps.
6. Avantages économiques externes	
Réduit les charges de pointe d'électricité urbaine, ce qui pourrait diminuer les tarifs énergétiques et les coûts de modernisation des infrastructures pour les services publics.	Impact limité sur des facteurs économiques plus larges, avec des bénéfices limités aux fabricants d'équipements et aux prestataires de services.

Crée des opportunités de création d'emplois pendant les phases de construction et d'exploitation.	

Tableau 5. Avantages et défis économiques du RFU par rapport aux technologies de refroidissement conventionnelles.

Résumé

1. Coûts en capital : Les systèmes RFU ont des coûts initiaux élevés, mais les économies d'échelle les rendent rentables dans les zones denses, contrairement aux systèmes autonomes moins coûteux avec des équipements dupliqués.
2. Coûts opérationnels : Les systèmes RFU sont plus économes énergétiquement et moins coûteux à entretenir grâce à des opérations centralisées, tandis que les systèmes conventionnels ont des coûts à long terme plus élevés.
3. Économies à long terme : le RFU offre des économies significatives sur le long terme, tandis que les systèmes autonomes engendrent des coûts totaux de possession plus élevés.
4. Revenus : RFU crée des sources de revenus stables via des contrats, contrairement aux systèmes conventionnels.
5. Risque : Le RFU présente un risque financier initial plus élevé mais des bénéfices stables à long terme ; les systèmes conventionnels présentent des risques de démarrage plus faibles mais des coûts d'exploitation volatils.
6. Avantages externes : Le RFU réduit les charges de pointe urbaines et soutient les économies locales, tandis que les systèmes autonomes ont un impact plus large limité.

Réglementation tarifaire par le gouvernement

Comme la plupart des services publics, le refroidissement urbain nécessite un cadre réglementaire adéquat qui protège les promoteurs, les fournisseurs, les consommateurs et l'économie au sens large.

Singapour a désigné des zones de service spécifiques pour l'attribution des concessions de refroidissement urbain et soumet les tarifs à un rendement défini sur les actifs.

Les gouvernements du Danemark, des Pays-Bas, de Norvège et de Pologne ont encouragé l'adoption du chauffage urbain et emploient des méthodes telles que la régulation des prix, les zones d'application obligatoires, le soutien financier et la propriété étatique des réseaux de circulation de chaleur.

Les gouvernements devraient établir un cadre tarifaire cohérent pour le refroidissement urbain. Cela signifie définir le modèle d'allocation des frais initiaux, récurrents et de consommation aux promoteurs immobiliers, aux propriétaires individuels et aux locataires. Les gouvernements doivent faire respecter l'utilisation cohérente de tels modèles de tarification entre les projets. Ces modèles doivent protéger les propriétaires et locataires individuels contre l'arbitrage des prix immobiliers.

Les modèles de tarification devraient chercher à aligner les frais payés par les utilisateurs sur la consommation réelle de refroidissement. Dans certains cas, une régulation des prix sera nécessaire pour fournir des tarifs équitables aux utilisateurs, tout en accordant des retours aux services de refroidissement urbain proportionnels aux risques de l'industrie.

Étude d'Alajmi et Zedan (2020) au Koweït (Fig. 28).

Cette étude démontre des avantages significatifs en termes de coût et d'exploitation des systèmes de refroidissement urbain (FRU) par rapport aux méthodes traditionnelles de refroidissement. Le coût total diminue considérablement, passant de 22 669 millions de dollars pour les unités de toiture (RTU) et 20 829 millions pour les systèmes à débit fluide frigorigène variable (VRF) à 17 395 millions de dollars

pour le système RFU. De plus, le système RTU nécessite 660 200 unités de refroidissement, le système VRF 220 800 unités, tandis que le système RFU n'en nécessite que 624. Cette réduction drastique affecte plusieurs facteurs : elle réduit les heures de travail nécessaires pour le service, la maintenance et l'exploitation ; réduit l'espace de toiture nécessaire pour les équipements de refroidissement dans les bâtiments résidentiels ; diminue le nombre de pièces détachées nécessaires ; et réduit considérablement le risque de fuites de fluide frigorigène en raison du moins d'unités individuelles en fonctionnement [36].

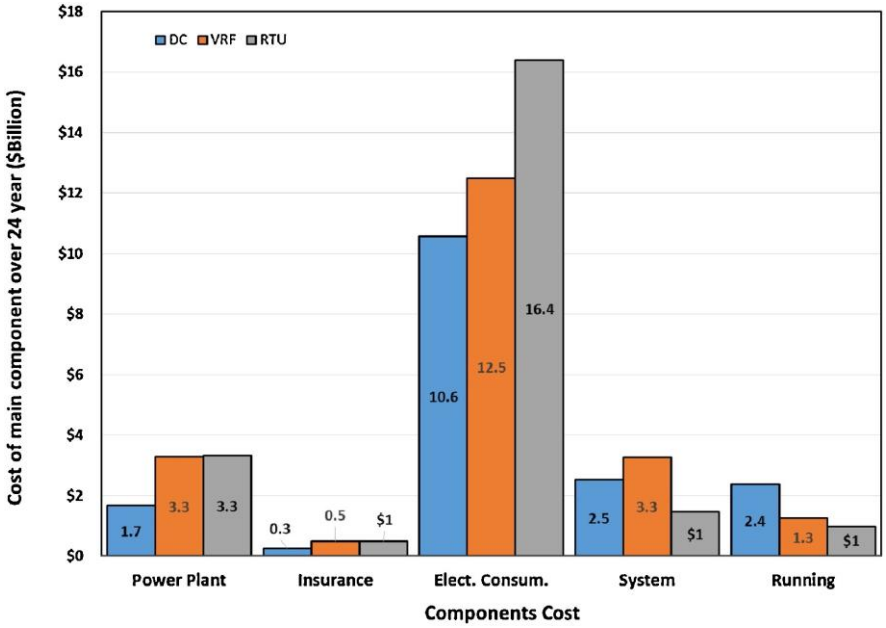


Fig. 28. Coût économique des différentes technologies à Alajmi et Zedan (2020) au Koweït [36]

Comment les entreprises, gouvernements et particuliers peuvent-ils contribuer à la RCF ?

Les gouvernements jouent un rôle clé dans la préparation du terrain au progrès en fixant des objectifs climatiques ambitieux et en mettant en œuvre des politiques favorables. En encourageant l'adoption de technologies économes en énergie comme le refroidissement urbain, ils réduisent non seulement les émissions de gaz à effet de serre, mais stimulent aussi la croissance économique des industries vertes.

Ces politiques peuvent encourager les entreprises à diversifier leurs portefeuilles, en investissant dans des projets d'énergie propre et des solutions innovantes. À mesure que les entreprises s'adaptent et évoluent, elles contribuent à une économie verte florissante qui non seulement crée des emplois, mais assure également une durabilité à long terme.

Les individus peuvent faire des choix conscients concernant la consommation d'énergie, allant de l'utilisation d'appareils économes en énergie à la réduction du gaspillage d'eau. De plus, les individus peuvent s'engager dans des initiatives communautaires et sensibiliser à l'importance de la durabilité.

En fin de compte, c'est grâce à un effort collaboratif que gouvernements, entreprises et particuliers travaillent de concert pour réaliser le changement transformateur nécessaire pour relever les défis pressants du changement climatique et construire un monde plus durable pour les générations à venir.

Le cas des pays du Golfe

Dans de nombreux cas, les prix de l'électricité sont trop bas, ce qui fait que les systèmes urbains ne semblent viables qu'à des niveaux de densité de refroidissement très élevés. Les gouvernements

devraient désigner des zones appropriées de densité suffisante pour le refroidissement urbain et inclure cette technologie dans l'urbanisme.

Le refroidissement représente 50 % de la consommation annuelle d'électricité, soit un coût d'opportunité annuel en carburant d'environ 20 milliards de dollars. Bien utilisé, le refroidissement urbain pourrait fournir environ 30 % des besoins prévus d'ici 2030. Cela éviterait que la région ait à construire 20 GW de nouvelle capacité de production d'électricité, et permettrait d'économiser 200 000 barils d'équivalent pétrole par jour en carburant [37].

4.4. Impact environnemental du refroidissement urbain

Émissions de carbone

Réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) : Une grande efficacité et une intégration avec des sources d'énergie renouvelables (par exemple, refroidissement solaire, géothermie) ou la récupération de chaleur fatale peuvent réduire significativement les émissions de CO_2 par rapport aux systèmes conventionnels. L'utilisation de sources d'électricité à faibles émissions (par exemple, hydroélectricité ou éolienne) amplifie ces avantages.

Gestion du fluide frigorigène : Les systèmes centralisés permettent l'utilisation de fluides frigorigènes respectueux de l'environnement avec un faible potentiel de réchauffement climatique (PRG) et une meilleure maîtrise du confinement pour réduire les fuites.

Optimisation des ressources

1. Utilisation de l'eau : Les systèmes centralisés peuvent optimiser la consommation d'eau pour les processus de refroidissement, en particulier dans les systèmes de refroidissement par évaporation. Cependant, les systèmes gourmands en eau peuvent solliciter les ressources locales en eau dans les régions arides, sauf si des sources d'eau alternatives (par exemple, les eaux usées traitées) ne sont utilisées.
2. Utilisation des sols : Les systèmes RFU réduisent le besoin d'équipements mécaniques dans les bâtiments individuels, libérant ainsi des toits et des espaces intérieurs pour d'autres usages, tels que les panneaux solaires ou les toitures végétales.

Étude d'Alajmi et Zedan (2020) au Koweït.

Un facteur d'émission élevé de CO2 rend encore plus importante une grande efficacité énergétique (Fig. 29, 30).

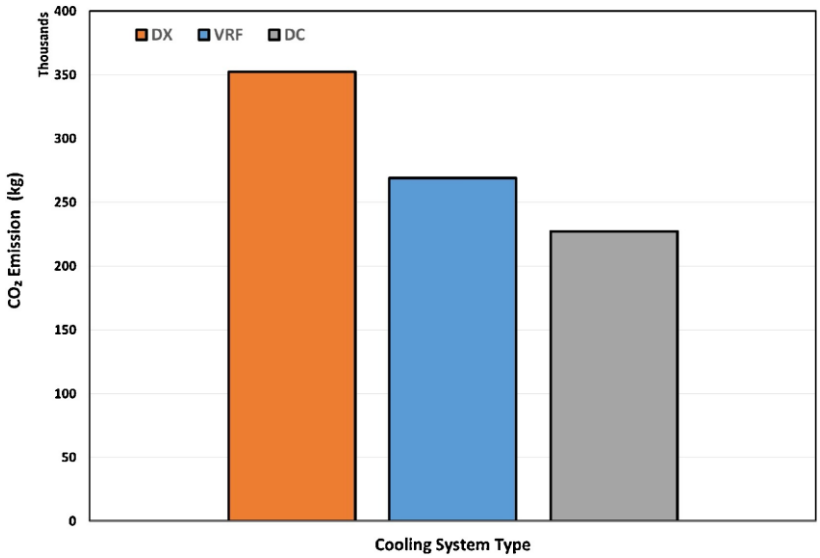


Fig. 29. Émissions de CO2 en fonction du type de système de refroidissement [37].

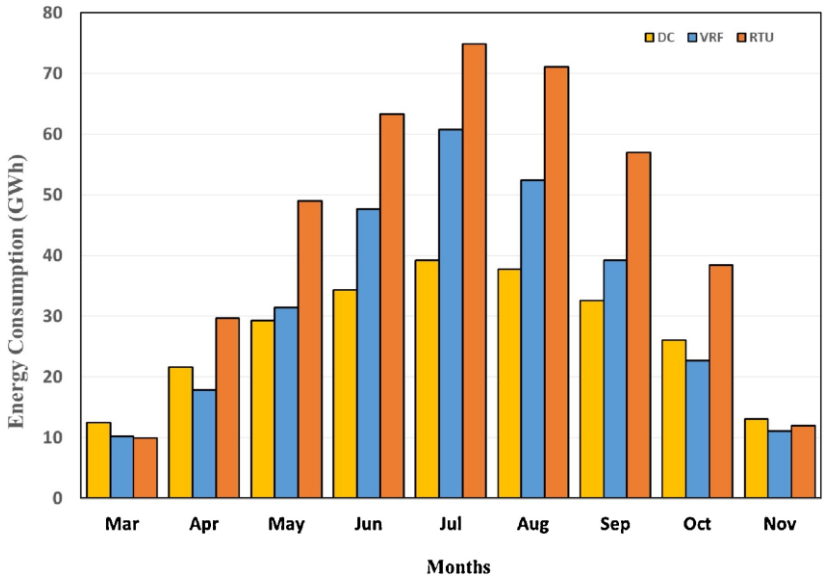


Fig. 30. Consommation d'énergie pour différents systèmes de refroidissement [37].

Effet de l'îlot de chaleur urbain (ICU)

1. Rejet centralisé de la chaleur : En déplaçant le rejet de chaleur de plusieurs bâtiments vers un emplacement centralisé, les systèmes RFU réduisent la production locale de chaleur qui contribue à l'effet ICU.
2. Conception du système : Les systèmes RFU peuvent utiliser des plans d'eau ou des systèmes souterrains pour la dissipation de la chaleur, minimisant ainsi l'impact environnemental sur les températures urbaines.

Intégration avec les technologies durables

1. Utilisation de la chaleur fatale : Les systèmes RFU peuvent s'intégrer à la récupération de la chaleur fatale provenant de procédés industriels ou de centrales électriques, transformant la chaleur excédentaire en ressource de refroidissement et améliorant ainsi l'utilisation globale de l'énergie.
2. Renouvelables et sources à faible émission de carbone : Les systèmes RFU peuvent intégrer des sources d'énergie renouvelable telles que le solaire thermique, la géothermie ou la chaleur fatale à basse température, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles.

Gestion des déchets et impacts sur le cycle de vie

1. Réduction de l'élimination des équipements : Les systèmes centralisés réduisent le besoin de nombreuses petites unités de refroidissement, réduisant ainsi la production et l'élimination des équipements au fil du temps.
2. Longévité des infrastructures : Les systèmes RFU ont généralement une durée de vie plus longue que les systèmes de refroidissement conventionnels, ce qui entraîne des impacts environnementaux sur le cycle de vie plus court.

Inconvénients potentiels

1. Dépendance aux sources d'énergie : S'ils sont alimentés par des combustibles fossiles, les systèmes RFU peuvent avoir des émissions plus élevées, notamment dans les régions aux réseaux électriques à forte intensité carbone.

2. Impacts dans la construction : La construction d'un réseau RFU nécessite des excavations importantes et un développement d'infrastructures, ce qui peut temporairement perturber les écosystèmes et les environnements urbains.
3. Pertes thermiques : Une isolation inefficace des canalisations ou un transfert de chaleur longue distance peuvent entraîner des pertes d'énergie, réduisant ainsi l'efficacité globale du système.

4.5. Optimisation des technologies de refroidissement urbain

Optimisation économique pour la réduction des coûts opérationnels

Économies d'échelle :

Dans les systèmes de refroidissement urbain à grande échelle, les coûts initiaux d'investissement (par exemple, construction de la centrale de production, infrastructure de pipeline) peuvent être répartis entre plusieurs consommateurs. Cela réduit le coût en capital par unité par rapport aux systèmes décentralisés.

Une conception soigneuse et une standardisation des équipements (par exemple, refroidisseurs, pompes et tuyaux) peuvent conduire à des coûts de construction plus bas et à une mise en œuvre plus rapide.

Conception modulaire :

Les systèmes modulaires permettent une mise en œuvre par étapes, réduisant ainsi le fardeau initial des investissements. Cette flexibilité permet aux opérateurs de faire évoluer le système à mesure que la demande augmente, garantissant une utilisation efficace du capital.

Maintenance centralisée :

Les opérations centralisées simplifient la maintenance et réduisent les coûts, car l'ensemble du système peut être entretenu en une seule fois, évitant ainsi la nécessité d'une maintenance séparée des unités individuelles dans les systèmes décentralisés.

La maintenance prédictive utilisant l'analyse des données peut encore réduire les temps d'arrêt et les coûts de réparation imprévus, améliorant ainsi l'efficacité opérationnelle.

Efficacité énergétique :

Optimiser la consommation d'énergie grâce à l'intégration de refroidisseurs à haute efficacité, de variateurs à vitesse variable et de systèmes de contrôle avancés peut réduire la consommation énergétique globale des systèmes RFU.

La mise en place de systèmes centraux de stockage d'énergie thermique permet un refroidissement hors pointe, réduisant ainsi les coûts liés à la demande d'électricité aux pointes, qui est souvent plus coûteuse.

Intégration avec la chaleur fatale :

Utilisant la chaleur évacuée provenant de procédés industriels ou de centrales électriques, créant une opportunité de recycler l'excès d'énergie thermique grâce à des systèmes de sorption pour refroidir au RFU. Le refroidissement à partir d'évaporateur non utilisé dans les pompes à chaleur peut également être injecté dans le RFU.

Intégration des énergies renouvelables :

L'intégration de sources d'énergie renouvelable telles que l'électricité solaire, thermique, géothermique ou à faible émission de carbone, combinée à des systèmes de sorption fournissant un

refroidissement au RFU, réduit encore les coûts opérationnels en diminuant la dépendance aux combustibles fossiles et en stabilisant les prix de l'énergie.

Le refroidissement solaire, par exemple, peut être directement intégré au réseau RFU pour réduire les coûts opérationnels, notamment dans les régions ensoleillées. La technologie doit encore être davantage développée.

Utilisation de fluides frigorigènes à faible PRG :

Optimiser le choix des fluides frigorigènes pour utiliser des fluides à faible potentiel de réchauffement climatique (PRG), tels que les fluides frigorigènes naturels ou les alternatives synthétiques à faible PRG, réduit l'impact environnemental du système de refroidissement.

Les avancées dans la gestion des fluides frigorigènes (par exemple, les systèmes de détection de fuites et un entretien approprié) garantissent des pertes de fluide frigorigène minimales, réduisant ainsi l'empreinte carbone globale du système.

Décarboner l'approvisionnement en énergie :

Connecter les systèmes RFU à un réseau décarboné, alimenté par des sources renouvelables comme l'éolien, le solaire ou l'hydroélectricité, réduit considérablement les émissions associées au refroidissement.

Lorsque les systèmes RFU sont associés à la production d'énergie renouvelable (par exemple, le solaire photovoltaïque pour l'alimentation auxiliaire), la performance environnementale globale du système s'améliore.

Gestion efficace de l'eau :

Les systèmes à courant continu utilisant l'eau dans les processus de refroidissement peuvent optimiser la consommation d'eau en mettant en place des systèmes en boucle fermée ou en utilisant des sources d'eau non potable, telles que les eaux usées traitées.

Réseaux intelligents et IoT :

L'intégration de la technologie des réseaux intelligents et des capteurs Internet des objets (IoT) dans le système RFU permet la surveillance en temps réel, l'équilibrage dynamique de la charge et l'analyse prédictive, optimisant la consommation d'énergie et l'efficacité opérationnelle.

Des algorithmes intelligents peuvent ajuster les paramètres du système en fonction de la demande, des prévisions météorologiques et des prix de l'énergie, réduisant ainsi le gaspillage d'énergie et optimisant les performances.

Réponse à la demande :

L'intégration de stratégies de réponse à la demande, où la demande de refroidissement est déplacée aux heures creuses, réduit le coût énergétique global et atténue la pression du réseau. Elle soutient également l'intégration de sources d'énergie renouvelable variables.

Systèmes de secours :

Inclure la redondance dans la conception du système (par exemple, refroidisseurs de secours ou stockage thermique) garantit que les besoins de refroidissement sont satisfaits même lors des pics de demande ou de défaillance des équipements, évitant ainsi les perturbations opérationnelles et réduisant les coûts de réparation d'urgence.

Les systèmes résilients minimisent les temps d'arrêt du système, ce qui peut autrement entraîner des coûts élevés et des conséquences environnementales en raison de la nécessité de solutions temporaires comme le refroidissement d'urgence.

4.6. Conclusions

Pour déterminer l'adéquation d'un réseau de refroidissement urbain (RFU), une étude approfondie de la densité de demande est essentielle, en tenant compte des bâtiments, des consommateurs industriels et des centres de données. Cette analyse va au-delà des projets conventionnels de CVC et de réfrigération en intégrant d'autres disciplines telles que les systèmes d'information géographique (SIG). Lorsque la densité de la demande est correctement justifiée et les risques minimisés, un RFU bien conçu peut surpasser les systèmes de refroidissement traditionnels, offrant des périodes de retour sur investissement attractives. Contrairement aux solutions de refroidissement conventionnelles, l'intervention du gouvernement est cruciale dans le développement et la régulation des RFU, les promouvant sous un angle économique, environnemental et urbaniste. Au-delà de l'efficacité énergétique, les RFU contribuent à réduire les effets d'îlots de chaleur urbains, à minimiser les déchets et à permettre l'intégration avec des technologies durables. Cependant, les RFU nécessitent des stratégies de contrôle et d'optimisation plus sophistiquées pour garantir la rentabilité et l'efficacité énergétique, où les avancées en IoT et technologies de communication jouent un rôle essentiel.

5. Études de cas sur les projets réalisés

Ce sujet présente dix études de cas représentatives, chacune avec ses conditions et particularités. L'objectif est de comprendre les sujets suivants :

1. Projets réussis de chauffage et de climatisation urbain utilisant des refroidisseurs de différents climats
2. Performance et économies d'énergie grâce aux refroidisseurs en RFU
3. Concevoir, installer et exploiter des pompes à chaleur dans des projets de chauffage et de climatisation urbains
4. Meilleures pratiques pour intégrer les pompes à chaleur dans les infrastructures de refroidissement urbain, y compris les considérations concernant le dimensionnement du système, le stockage thermique et les stratégies de contrôle

Les études de cas incluront uniquement les réseaux de chauffage urbain, ainsi que les réseaux combinés de chauffage et de climatisation urbains.

D'autres études de cas peuvent être consultées dans la littérature.

5.1. RFU Université James Cook (Townsville, Australie) [38]

Aperçu (Fig. 31)

L'université James Cook à Townsville occupe un campus distribué d'environ 255 hectares avec 28 bâtiments académiques. La surface totale climatisée est de 69 000 m². Le campus s'est agrandi par étapes, chaque nouveau bâtiment étant équipé de sa propre installation de climatisation indépendante. Beaucoup de refroidisseurs à réfrigération ont déjà du vieillissement, certains jusqu'à 35 ans, et la plupart devraient nécessiter un remplacement dans les cinq prochaines années, pour un coût estimé à 9 millions de dollars. Actuellement, la capacité totale de la centrale alimentant 29 sites est d'environ 11,5 MW de refroidissement. Le campus prévoit de s'étendre davantage, ajoutant 25 200 m² de surface climatisée d'ici 2010 et 25 000 m² supplémentaires d'ici 2015.

Conception (Fig. 32)

Le stockage d'énergie thermique (TES) profite des moments de jour ou de nuit où la demande de refroidissement dépasse la moyenne en faisant fonctionner la centrale d'eau refroidie pour refroidir l'eau de retour (de 15°C) à l'eau refroidie à 6°C. Le bâtiment de la centrale d'énergie contient trois refroidisseurs centrifuges à haute efficacité, chacun évalué à 4,2 MW, avec de la place prévue pour deux refroidisseurs supplémentaires à l'avenir. La centrale comprend également des pompes à eau refroidie primaire et secondaire équipées de variateurs à vitesse, des pompes à condenseur également équipées de variateurs à vitesse, et quatre tours de refroidissement évaluées à 5,1 MW chacune, avec des dispositions pour une cinquième tour. Les ventilateurs des tours de refroidissement sont équipés de variateurs de vitesse pour améliorer l'efficacité.

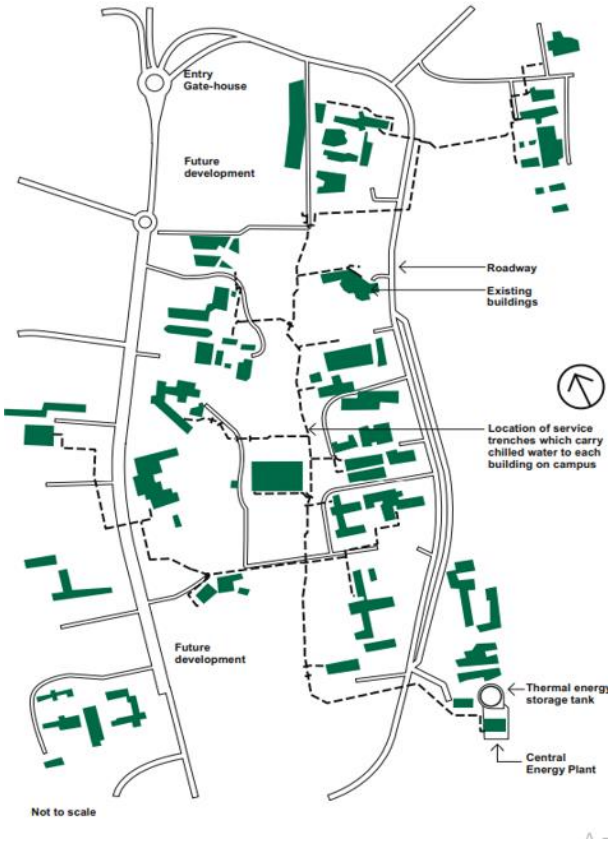


Fig. 31. Plan du site Campus de Townsville de l'Université James Cook [38].

Le réservoir TES de 12 mégalitres contient des diffuseurs d'eau spécialement conçus sur le haut et le bas, permettant à l'eau de sortir ou d'entrer dans le réservoir sans turbulence.

Le refroidisseur et l'installation de stockage d'eau sont situés dans la partie sud-est du campus, à une altitude suffisante pour garantir que le niveau d'eau dans le réservoir thermique représente le point le plus élevé du réseau d'eau froide, assurant ainsi la hauteur statique.

La centrale de production **a un coefficient de performance (COP est une mesure d'efficacité) de 6 en conditions estivales de 33°C pour bulbe sec et 27°C pour bulbe humide (conditions de dimensionnement).**

L'eau est distribuée sur 7,8 km de tuyauterie souterraine non isolée, alimentée vers chaque bâtiment.

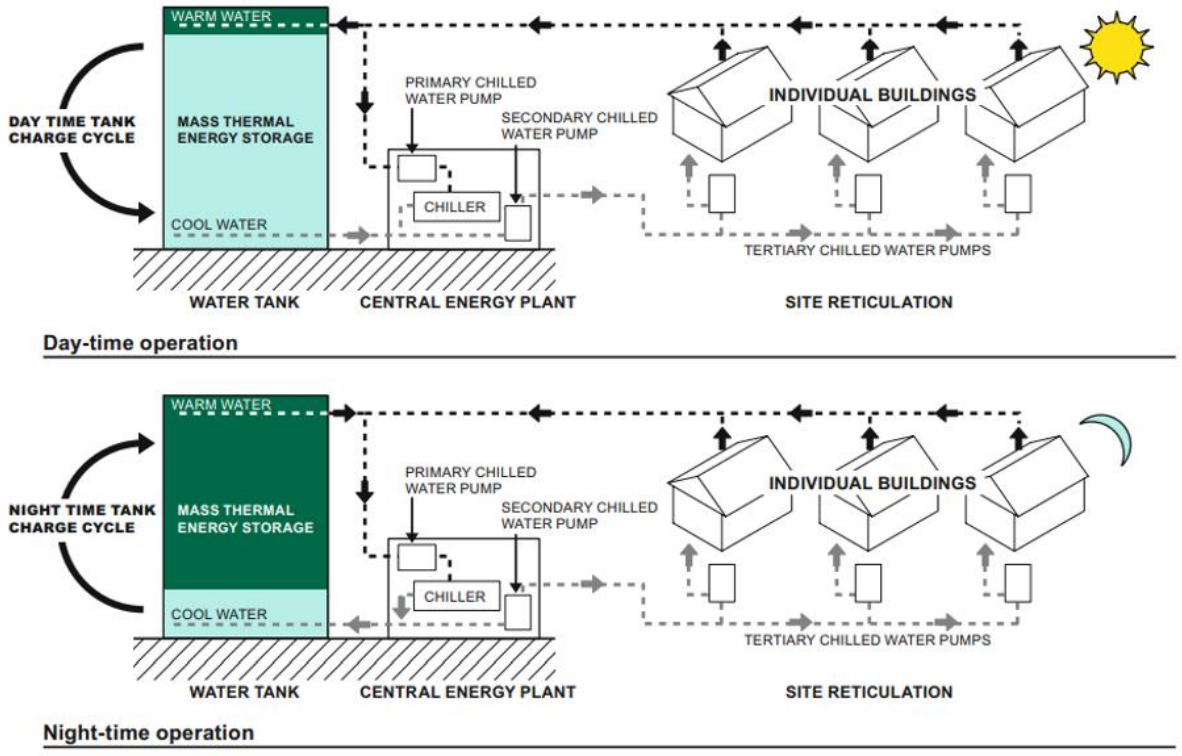


Fig. 32. Organigramme de procédé [38].

Principales conclusions

1. Améliorations de l'efficacité du système : Les principales caractéristiques qui améliorent l'efficacité incluent la stratégie de contrôle de la centrale de production, les moteurs de refroidissement haute tension, la disposition optimisée des tuyaux CEP et l'utilisation de tuyaux souterrains d'eau refroidie, qui contribuent tous à des économies de coûts et à la flexibilité du système.
2. Économies sur les coûts d'investissement : L'utilisation de moteurs haute tension et l'évitement des transformateurs basse tension éliminent les pertes de transformateurs et les infrastructures supplémentaires, économisant ainsi 800 000 $ en coûts d'investissement.
3. Réseau de distribution d'eau glacée : L'utilisation de canalisations en PEHD (polyéthylène haute densité) à la place de canalisations calorifugées permet de réduire les coûts, de limiter le nombre de raccords et d'offrir une plus grande flexibilité pour les extensions futures.
4. Gains énergétiques et d'efficacité : Un différentiel de température plus élevé (9°C) réduit l'énergie de pompage et la taille des tuyaux, ce qui entraîne une consommation d'énergie moindre et des économies à long terme.
5. Impact environnemental et économique : Le projet réduira les coûts énergétiques de 990 000 $, diminuera la demande maximale du site de 4,5 MW et réduira les émissions de gaz à effet de serre de 12 000 tonnes de CO_2e.

5.2. Quartier de La Pinada [39]

Aperçu

Le Barrio La Pinada est un lotissement urbain privé situé à Paterna, près de la ville de Valence, qui devrait couvrir 320 000 habitants.m^2

Le Barrio La Pinada est un nouveau développement urbain qui n'a pas encore commencé sa construction. Cela offre l'opportunité de créer le réseau à partir de rien, en correspondant aux caractéristiques d'une nouvelle étude de cas réseau.

La demande totale à satisfaire est de 9,4 GWh (7,52 résidentiels et 1,88 commerciaux).

L'approvisionnement est également une construction neuve utilisant les RES (système d'énergie renouvelable) comme source. Plus précisément, 60 % de la demande sera couverte par l'énergie géothermique DCL (charge de refroidissement de conception) et les 40 % restants par des pompes à chaleur aérothermiques. Bien que cette division soit reconnue, pour réaliser une étude de cas prudente, les coûts pris en compte seront ceux d'une centrale géothermique, qui sont plus élevés et donc plus restrictifs.

Les principales caractéristiques de l'approvisionnement sont présentées dans le tableau 6.

	Approvisionnement
Technologie	Géothermie/Aérotherme
Energie utilisée	Électricité
Capacité maximale	5 MW
Coûts fixes	200 000 €
Coûts de capacité	500 €/kW
Coûts annuels de l'exploitation et de maintenance	30 €/kW
Coûts d'approvisionnement	1,4 c€/kWh

Tableau 6. Caractéristiques du réseau [39].

Topologie du réseau

Barrio La Pinada prévoit de connecter toutes les demandes du quartier au réseau de chauffage et de climatisation urbain, de sorte que presque tous les bâtiments ont été aménagés selon les besoins.

Les seuls qui ont été exclus de l'étude de cas étaient deux à l'extrémité sud du lotissement, qui correspondent à une école. Ce choix s'explique par le fait que ces bâtiments ont déjà été construits et ne feront donc pas partie du prochain projet. 73 bâtiments ont été connectés, couvrant 100 % de la demande proposée et ne laissant que l'école de côté.

L'optimisation détermine que seuls 3,3 MW de la capacité disponible (5 MW) seraient nécessaires pour répondre à la demande du projet. L'investissement en capital associé de 2,14 millions € s'aligne avec d'autres développements géothermiques.

Solution réseau (Tableau 7)

Solution de tuyauterie		Solution de production		Solution à la demande	
Longueur	**6,76 km**	**Capacité totale requise**	**3,88 MWp**	**Pic total de demande**	**6,16 MW**
Coût total	1,35 M€	Production	11,05 GWh/an	Demande	9,2 GWh/an
Coût linéaire	200 €/m	Coût en capital	2,14 M€	Revenus	0,405 M€/an
Pertes	1,85 GWh/an	Coût d'exploitation : O&M	0,12 M€/an	-	-
Capacité	3,88 MW	Coût d'exploitation : production de chaleur	0,15 M€/an	-	-

Tableau 7. Solution réseau Barrio la Pinada [39].

Analyse (Tableau 8)

Le fait le plus important à considérer lors de l'analyse des finances du projet est la décision de ne pas considérer la rentabilité économique comme principal moteur du développement. Au contraire, le Barrio La Pinada vise à fournir à ses habitants des technologies propres et innovantes tout en maintenant un prix qui ne soit pas prohibitif pour les logements modestes.

Pour y parvenir, la méthodologie de l'étude de cas a été modifiée. Au lieu de fixer le tarif et de laisser l'outil décider quelles demandes connecter pour que le projet soit rentable, un tarif initial a été défini puis réduit jusqu'à atteindre une VAN (Valeur Actuelle Nette) positive minimum (en considérant un horizon temporel de 50 ans et un taux d'actualisation de 3 %). Ainsi, le tarif minimum rentable (15 €/kW + 3,4 c€/kWh) a été obtenu, ce qui explique la faible VAN du projet.

	Coût en capital	**Coût d'exploitation**	**Chiffre d'affaires d'exploitation**	**VAN**
Tuyauterie	-1,35 M€	-	-	-1,35 M€
Alimentation en chaleur	-2,14 M€	-0,27 M€/an	-	-9,35 M€
Exigences	-	-	0,41 M€/an	-10,74 M€
Émissions	Non inclus à ce stade			
Réseau	**-3,49 M€**	**-0,27 M€/an**	**0,41 M€/an**	**0,06 M€**

Tableau 8. Analyse réseau Barrio la Pinada [39].

5.3. Extension du réseau RCF Bristol Redcliff [40]

Aperçu

Le conseil municipal de Bristol (Fig. 33) planifie activement depuis plus de 10 ans des réseaux de chauffage afin d'aider à fournir un chauffage abordable et à faible émission de carbone dans toute la ville et de contribuer à son objectif de carbone net zéro d'ici 2030.

Le Conseil a initialement développé un réseau du centre-ville qu'il espère développer à l'avenir. Il utilisera des sources de chaleur à faible ou zéro carbone telles que la chaleur fatale, les voies navigables locales et les anciennes mines.

Cette étude de cas envisage d'élargir le réseau de développement comprenant huit nouveaux bâtiments en ajoutant un ou plusieurs bâtiments. Le plan de réseau plus large reliera finalement environ 60 bâtiments, principalement existants.

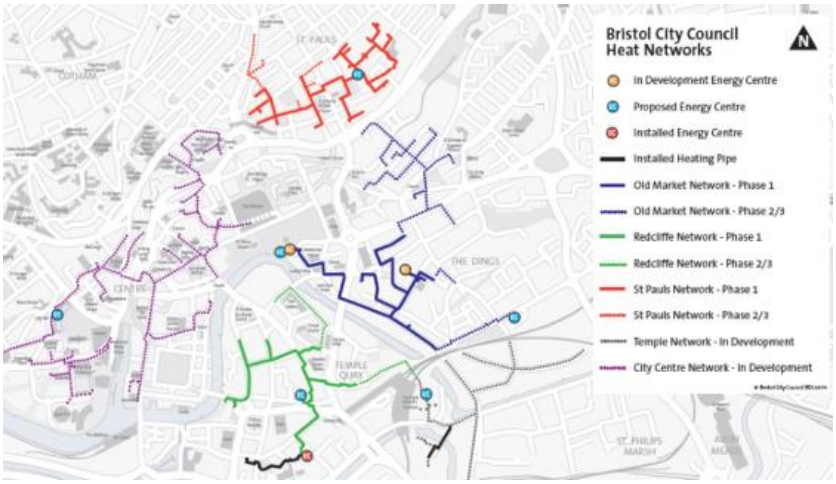


Fig. 33. Plan du réseau RCF Bristol Redcliff [40].

Principales conclusions

1. Précision de la modélisation THERMOS

La conception finale du réseau thermique modélisée à l'aide de THERMOS a été validée par rapport à un modèle hydraulique détaillé. L'analyse a couvert 47 tuyaux, soit un total de 1 365 mètres sur l'ensemble du réseau de 5 969 mètres. Les résultats ont montré que 70 % des segments de tuyaux correspondaient exactement en taille entre les deux modèles, et 97 % étaient à moins d'une différence de taille de tuyau. Ces résultats indiquent que THERMOS fournit une approximation fiable et peut servir efficacement de substitut à une modélisation hydraulique plus détaillée

2. Expansion de la charge et évaluation de la capacité

Pour évaluer la capacité disponible dans le réseau, des charges supplémentaires ont été introduites sur deux branches. Comme les données sur la capacité thermique telles que construites n'étaient pas disponibles, la taille des tuyaux servait de paramètre de référence principal. La méthode consistait à augmenter progressivement les charges des bâtiments à l'extrémité des lignes réseau jusqu'à dépasser la limite existante de taille des canalisations. Cette approche permet une estimation rapide de la capacité disponible, facilitant des évaluations rapides pour répondre aux nouvelles demandes de charge.

3. Dimensionnement des tuyaux et analyse de l'impact de la charge

Une section spécifique du réseau équipée d'un tuyau de 160 mm installé a été analysée. Les calculs du THERMOS ont indiqué qu'un seul tuyau de 100 mm était initialement nécessaire, confirmant qu'il y avait une capacité suffisante pour de nouvelles connexions. Cependant, lorsque deux nouvelles charges de 1,75 MW et 2 MW ont été ajoutées, la taille requise de la conduite a augmenté à 150 mm. Étant donné que la taille de la conduite installée est de 160 mm, cela suggère que la section approche de sa pleine capacité.

4. Revue de la capacité des centres d'énergie

La charge de pointe diversifiée au centre énergétique était initialement de 5,05 MW. Après l'ajout des charges supplémentaires, la charge de pointe est passée à 7,37 MW.

5.4. RCF Parc de l'Alba [41]

Aperçu et motivation pour l'expansion du réseau (Fig. 34)

Le Parc de l'Alba exploite déjà un réseau énergétique urbain rentable et vise à l'étendre progressivement en accord avec le développement urbain.

L'accent initial est mis sur les bâtiments commerciaux et éducatifs, pouvant s'étendre aux zones résidentielles.

L'expansion vers des clients résidentiels individuels présente des défis de gestion en raison du grand nombre d'utilisateurs finaux. L'expansion est structurée en différentes phases



Fig. 34. Expansion du réseau RCF Parc de l'Alba [41].

Scénarios envisagés

a) Scénario de base (bâtiments déjà inclus dans les plans de construction et parcelles pour les installations publiques placées sur leur passage)

Demande en chaleur : 63 GWh/an

Demande en froid : 165 GWh/an

b) Scénario 1 (inclut, en plus de ce qui a été inclus dans le scénario de base, toutes les installations publiques supplémentaires et les parcelles résidentielles)

Demande en chaleur : 77 GWh/an

Demande en froid : 170 GWh/an

C) Scénario 2

Ce scénario inclut les mêmes bâtiments que le scénario alternatif 1. Dans ce cas, tous les terrains pour les infrastructures publiques seront inclus selon les besoins, forçant ainsi leur connexion au réseau, et les bâtiments résidentiels resteront optionnels.

Considérations

Les émissions prises en compte dans cette étude de cas ont été fournies :

CO_2 émissions : 0,202 kg/kWh.

Coût des émissions : 40 €/t. CO_2

Les coûts de construction du réseau et les tarifs de vente d'énergie ont été élaborés et validés lors de discussions avec le Parc de l'Alba. Les tarifs suivants ont été utilisés pour l'étude :

Charge unitaire : 3,3 €c/kWh.

Capacité : 28 €/kWp/an.

Dans la charge de capacité, les coûts de connexion ponctuels de 152 EUR/kW ont également été regroupés et répartis sur l'horizon temporel envisagé pour le projet.

Comparaison entre le scénario de base et ses deux alternatives (Tableau 9)

	Capacité totale d'approvisionnement (MW)	Bâtiments connectés	Demande satisfaite (GWH/an)	Longueur totale du réseau (km)	Coûts d'investissement (M€)	NPV (M€)
Base du scénario	60,5	82	140.88	8.9	27.42	14.95
Alternative 1	60,5	97	140.87	10.34	28.76	13.61
Alternative 2	60,5	102	141.43	12.89	31.01	11.50

Tableau 9. Comparaison de scénarios du RCF Parc de l'Alba [41].

5.5. RCF Barcelone (Espagne) [42]

Développement modulaire par étapes

Le système de chauffage et de climatisation urbain (RCF) a commencé à fonctionner en 2012 et suit un plan d'expansion en trois phases.

Phase 1 (2011-2012) – Infrastructures initiales

Le système comprend une centrale à biomasse, des chaudières à gaz, des refroidisseurs conventionnels et industriels, ainsi qu'un réseau de distribution partiel. Il dessert les zones de « La Marina » et « Zona Franca », qui étaient à l'origine des zones industrielles mais qui évoluent vers des développements à usage mixte avec de nouveaux projets résidentiels.

Phase 2 (2017-2019) – Intégration de la récupération excédentaire après le froid

Le système utilise le froid excédentaire généré par le processus de regazéification du GNL. Il dispose d'installations de stockage de glace et d'un réseau de transport conçu pour distribuer le froid récupéré, desservant principalement la zone portuaire.

Phase 3 (2017-2024) – Expansion du réseau

Vise à connecter 15 millions de m² de surface chauffée.

Faits clés et localisation (tableau 10)

Part de marché de la Forêt Profonde	N.A.
Capacité de chauffage et de climatisation	RCU : 23 MW (cible : 40 MW) RFU : 14 MW (objectif : 70 MW + 36 MW de stockage de glace)
Production thermique et de froid	RCU : 12 GWh/an (cible : 59 GWh/an) RFU: 7,6 GWh/an (cible : 54 GWh)
Réseau Km (double tuyau)	12 km (objectif : 36 km)
CO_2 Émissions	RCU : 94,9 kg/MWh RFU : 0 kg/MWh (émissions nettes, compensées par la production d'électricité CHP)

Tableau 10. Caractéristiques du RCF Barcelone [42].

1. Expansion progressive et mélange énergétique adaptatif

Le système est conçu pour une croissance progressive, intégrant diverses sources d'énergie et stratégies opérationnelles au fil du temps.

2. Principales installations de production et stockage d'énergie

Le système dispose d'une centrale à biomasse d'une capacité de 10 MWth et 2 MWe, alimentée par la biomasse de jardin et de forêts régionales pour fournir de l'énergie de base. Des chaudières à gaz sont utilisées pour couvrir les périodes de pointe de demande. La récupération excédentaire du froid capte l'énergie thermique issue de la regazéification du GNL au terminal Enagas de Barcelone, en utilisant le froid auparavant gaspillé. Des réservoirs de stockage frigorifique sont situés à Zona Franca pour stocker cette énergie. Un système de contrôle intelligent basé sur SCADA, connecté par fibre optique, permet une surveillance et une optimisation en temps réel, en mettant en œuvre une approche de réseau intelligent.

3. Intégration des terminaux GNL

Le terminal d'Enagas dispose d'une capacité de stockage de GNL de 760 000 m³ et d'une capacité d'émission de 1,95 million de m³(n)/h. L'approche d'Ecoenergies vise à récupérer le froid du GNL à -160 °C, réduisant ainsi efficacement le gaspillage énergétique. Bien que les clauses contractuelles soient encore en cours de négociation, il est prévu qu'Enagas fournisse le surplus de froid gratuitement.

Offre et demande sur le marché de l'énergie à Barcelone

1. Climat et demande énergétique

    a) Barcelone bénéficie d'un climat subtropical-méditerranéen, avec des hivers doux (~1150 HDD) et une forte demande de refroidissement.

    c) La demande de chauffage est relativement faible, tandis que la demande de refroidissement continue de croître.

2. Sources et consommation d'énergie actuelles

a) Chauffage : Principalement des solutions individuelles à base de gaz naturel.

b) Refroidissement : Principalement des systèmes à base d'électricité.

c) Intégration solaire thermique : En raison de l'Ordonnance sur la chaleur solaire (1999), les bâtiments neufs et rénovés doivent intégrer la chaleur solaire pour l'eau chaude domestique (DHW).

d) Consommation d'énergie :

Bâtiments existants : ~80 kWh/m²/an.

Nouveaux bâtiments : ~45 kWh/m²/an.

3. Structure du marché

a) Les consommateurs peuvent librement choisir leurs fournisseurs de gaz et d'électricité.

b) Le marché est modérément concentré, avec 5 à 6 fournisseurs couvrant 90 % de l'approvisionnement total en énergie.

Marché du chauffage et de la climatisation urbaine (RCF) et prix

1. Réglementation et gestion des tarifs

Le chauffage et la climatisation urbains (RCF) sont régulés par le Conseil municipal de Barcelone via la société publique Tersa, qui supervise les contrats de concession. Les opérateurs doivent proposer des tarifs compétitifs par rapport aux sources d'énergie conventionnelles.

2. Compétitivité des prix du RCF

Chauffage urbain (RCU) :

a) 42 EUR/MWh (hors TVA et coûts de connexion).
b) ~10 % moins cher que le gaz naturel (y compris les coûts du carburant, du pétrole et des équipements).
c) Refroidissement urbain (RFU) : 38 EUR/MWh, 5 à 12 % de moins que l'électricité.
d) Consommateurs industriels (modèle B2B) : Tarification négociée au cas par cas.

3. Démonstration de compétitivité : étude de cas Mercabarna

a) Campagne de mesure de l'électricité à grande échelle menée par Ecoenergies.
b) Identifier un remplacement potentiel de 32 GWh/an de demande d'électricité par du courant continu.
c) Économies estimées :
d) Réduction de 20 % des coûts d'électricité.
e) réduction des émissions de 8 730 tCO_2.

5.6. RCF Grand Stockholm [43]

Aperçu du RCU

Le chauffage urbain (RCU) comme stratégie clé de décarbonation : La Suède vise à atteindre la neutralité carbone d'ici 2045 et considère le RCU comme un facteur clé dans cet objectif. Le pays est

passé d'une dépendance exclusive aux combustibles fossiles — principalement le pétrole — dans les années 1970 à seulement 6 % aujourd'hui, principalement du gaz naturel. Cette transition vers le carburant a d'abord été motivée par la crise pétrolière des années 1970, qui a conduit à l'abandon des combustibles fossiles, et s'est récemment accélérée avec l'adoption croissante de sources d'énergie durables.

Sources d'énergie actuelles du RCU

1. Biomasse (principalement via des centrales de cogénération).
2. Conversion à l'énergie.
3. Récupération de chaleur en surplus.
4. Électricité renouvelable (via des pompes à chaleur et des chaudières électriques).

Impact sur les émissions de CO_2 (Fig. 35)

1. L'évolution du mélange de carburants entre 2003 et 2013 montre une baisse significative des émissions de CO_2.
2. RCU a joué un rôle clé dans la décarbonation de l'approvisionnement en chaleur de la Suède.

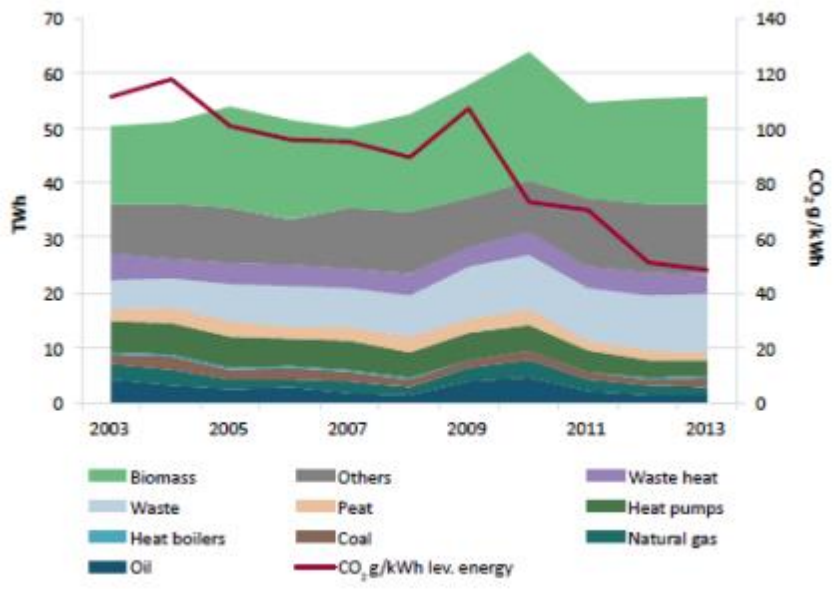


Fig. 35. Évolution du mélange de carburant entre 2003 et 2013 à RCF Stockholm [43].

Le refroidissement urbain (RFU) en Suède a connu une expansion rapide (Fig. 36), croissant à un rythme annuel approximatif de 20 % depuis la création du premier réseau RFU à Västerås en 1992, avec une augmentation significative de l'offre par la suite. Les principaux moteurs de cette croissance incluent la demande croissante de refroidissement due à des standards de confort plus élevés et le potentiel d'économie qui attire de grands consommateurs tels que les immeubles de bureaux, les centres de données et les supermarchés. De nombreux réseaux DC tirent parti du refroidissement gratuit en utilisant des sources naturelles de froid comme l'eau de mer et les lacs, ce qui réduit la consommation d'énergie et améliore l'efficacité du système. Les principaux clients sont principalement les bureaux, centres de données et supermarchés. Cette tendance à la hausse devrait se poursuivre à mesure que la demande et les objectifs de durabilité augmentent.

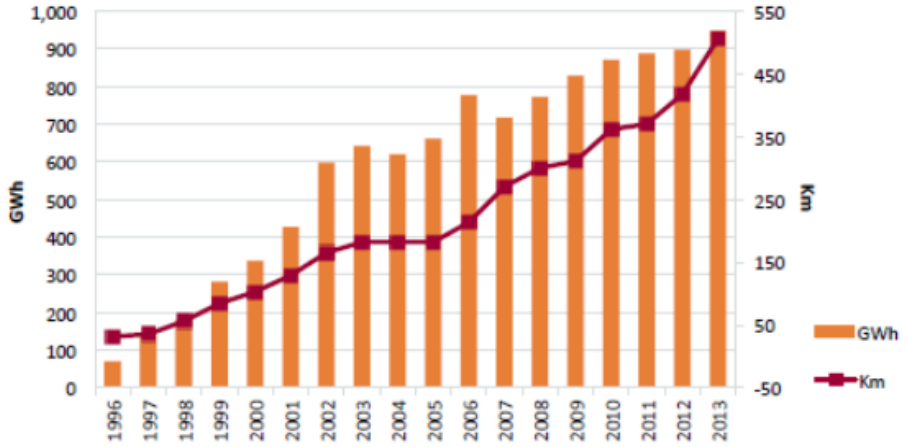


Fig. 36. Croissance énergétique et de longueur du réseau de froid au fil des années à Stockholm [43].

Faits clés

1. Grand système : moyenne 8 TWh/an, ~10 000 clients, approvisionnement direct à 6 municipalités
2. Partenariat public-privé : Le système RCF appartient et est exploité par Fortum Värme AB (50 % Ville de Stockholm, 50 % Fortum Heat & Power)
3. Production RCU flexible et optimisée :
    a) 7 centrales de cogénération (alimentées par des biocarburants, des déchets ou des combustibles fossiles)
    b) Pompes à chaleur
    c) Chaudières électriques
    d) Plusieurs chaudières alimentées par des biohuiles ou des combustibles fossiles
4. Refroidissement urbain : Un système majeur dans le centre-ville, et plusieurs plus petits autour.
5. Plus de 50 % des ventes sont produites par le refroidissement gratuit provenant de la mer et d'autres plans d'eau

Le tableau 11 présente les caractéristiques du réseau

Part de marché de la Forêt Profonde	80 % (zone couverte par RCU)
Capacité de chauffage et de climatisation	RCU : 3600 MW RFU : 220 MW
Production thermique et de froid	RCU : 7,4-10,8 TWh/a RFU: 380-440 GWh/a
Réseau Km (double tuyau)	RCU : 1330 km RFU : 200 km
CO_2 Émissions	RCU : 0,136 kg/MWh RFU : 0 kg/MWh (électricité renouvelable certifiée)

Tableau 11. Caractéristiques du RCF Stockholm [43].

5.7. Récupération de l'énergie froide RFU issue de la vaporisation de gaz naturel liquéfié [44]

Contexte

Les bâtiments représentent environ 40 % de la consommation énergétique mondiale, la demande de refroidissement augmentant régulièrement. La demande mondiale de refroidissement résidentiel devrait passer de 300 TWh en 2000 à 4 000 TWh d'ici 2050, atteignant 10 000 TWh d'ici 2100. Contrairement à la demande de chauffage, la demande de refroidissement est plus difficile à prévoir en raison de sa sensibilité à des facteurs tels que le rayonnement solaire, les gains de chaleur interne et les effets d'îlots de chaleur urbains.

Réaux de froid urbain (RFU)

Les systèmes de refroidissement urbain (RFU) fournissent une solution de refroidissement centralisée desservant plusieurs bâtiments (Fig. 37). Ils comprennent des composants clés tels que l'unité de production, le réseau de distribution, les clients et le système de rejet de chaleur. Les RFU sont reconnus comme la meilleure technologie disponible (BAT) au sein de l'Union européenne.

Déchets d'énergie froide provenant du GNL

La regazéification du GNL libère une quantité significative d'énergie froide, soit environ 1 245 MWh par an en Italie, à partir de centrales L-CNG, offrant un potentiel de refroidissement gratuit pouvant réduire la demande électrique dans les systèmes de climatisation. Cependant, aucune étude antérieure n'a exploré le couplage des réseaux de froid urbain (RCU) avec la récupération d'énergie froide à partir du GNL/GNC.

Étude de cas

Potentiel d'énergie froide (Fig. 38)

1. Consommation annuelle de GNL dans les stations GNL/GNC : 5400 t/an
2. Énergie froide gaspillée lors de la regazéification : 830 kJ/kg GNL
3. Énergie froide récupérable :

~380 kWht/jour (si on fonctionne 365 jours/an)

~550 kWht/jour (si on exclut les week-ends, 253 jours/an)

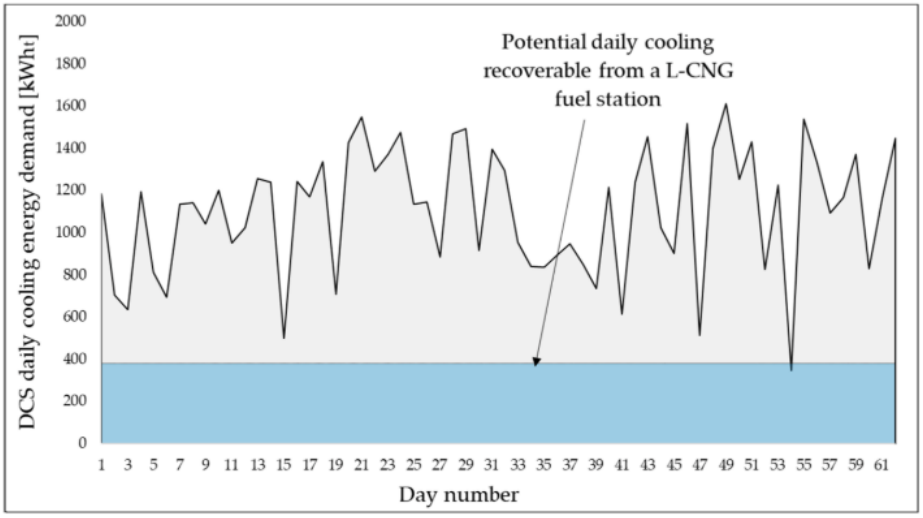


Fig. 37. Refroidissement quotidien potentiel récupérable depuis la station-service GNL/GNC pour RFU [44].

Profils de puissance de refroidissement

P1 : Production constante (10 h/jour, 365 jours/an).

P2 : Approvisionnement constant (hors week-ends et pauses déjeuner).

P3 : Profil variable avec pic entre 18 et 19 heures.

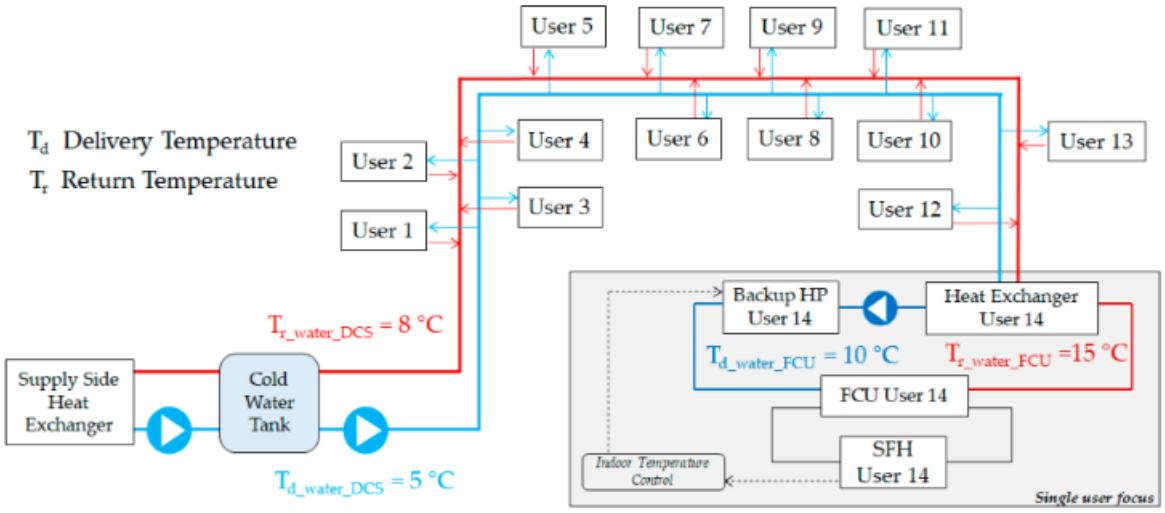


Fig. 38. Schéma RFU pour le GNL [44].

Résultats de la simulation

Demande des systèmes de refroidissement urbain (Fig. 39)

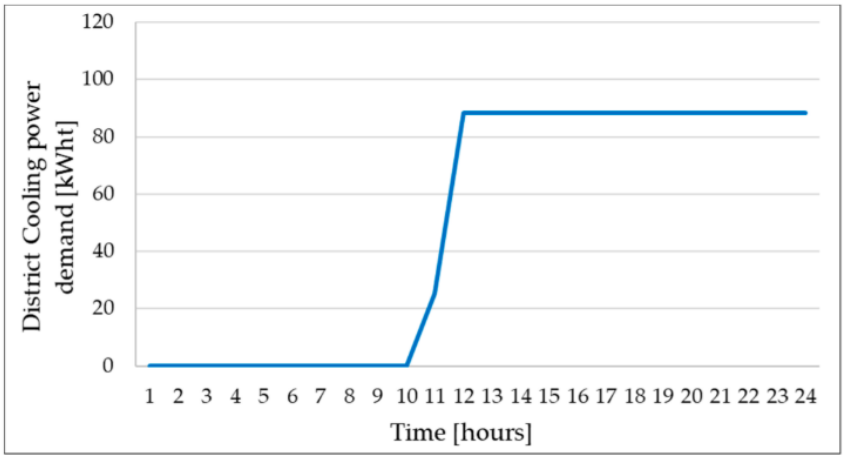


Fig. 39. Demande pour le système de refroidissement urbain en GNL [44].

Consommation d'énergie (Fig. 40)

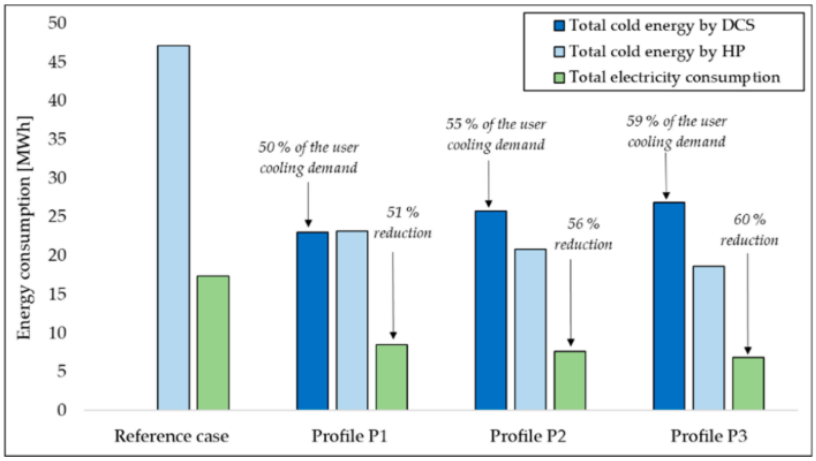


Fig. 40. Consommation d'énergie [44].

Cas de référence

1. Systèmes de refroidissement séparés : Unités à ventilateur alimentées par une pompe à chaleur
2. Demande de refroidissement (juillet–août) : 47 MWht
3. Consommation électrique : 17 MWhe

Analyse de la puissance de refroidissement gratuit

RFU directement connecté à l'échangeur de chaleur (sans TES) :

P1 (offre constante) : 50 % de la demande de refroidissement couverte, 52 % d'économies d'électricité

P2 (ajustement en semaine) : économie d'électricité de 58 %

P3 (offre variable) : moins efficace en raison du décalage entre l'offre et la demande

Impact du stockage d'énergie thermique (TES)

Introduction du char de 60 m³ :

Cas P3 : 59 % de la demande de refroidissement couverte, 60 % d'économies d'électricité

Cas P1 et P2 : impact minimal grâce à une production régulière

Permet un meilleur équilibre entre l'offre et la demande

Considérations de taille TES

1. Plage optimale : 30–90 m³
2. Réservoirs plus petits : inertie thermique insuffisante
3. Réservoirs plus grands : pertes de chaleur accrues et réponse du système plus lente

Conclusions

Les systèmes de refroidissement urbain (RFU) offrent des avantages significatifs, notamment un approvisionnement en énergie froide à faible coût avec des émissions de CO_2 réduites, l'intégration avec les énergies renouvelables, la trigénération et le stockage thermique, ainsi qu'une récupération efficace des déchets d'énergie froide, comme celles des stations de ravitaillement en GNL/GNC. Une étude de cas a démontré qu'une station GNL/GNC fournissant un refroidissement résidentiel a permis

d'économiser jusqu'à 60 % d'électricité grâce à un profil de charge P3 combiné à un stockage thermique de 60 m³, avec des économies générales dépassant 50 % dans tous les scénarios. Cependant, les résultats dépendent des hypothèses concernant la disponibilité de l'énergie des vaporisateurs GNL, ce qui indique la nécessité d'études supplémentaires sur le dimensionnement optimal du RFU et les stratégies de connexion utilisateur. Dans l'ensemble, la vaporisation du GNL montre un fort potentiel pour fournir efficacement le refroidissement résidentiel des quartiers, et l'intégration des systèmes de transport et de refroidissement résidentiel peut renforcer la durabilité urbaine.

5.8. RFU Ville de Stockholm [45]

Aperçu (Tableau 12)

Une étude préliminaire a mis en avant la possibilité d'utiliser une centrale de pompes de chauffage existante utilisant de l'eau de mer comme ressource pour la production simultanée de chaleur et de réfrigération pour le refroidissement urbain à Stockholm City.

La ville de Stockholm se compose de divers biens desservant différentes fonctions, tels que des bureaux et des centres commerciaux. La demande de refroidissement de la ville est élevée et en croissance grâce à l'augmentation du commerce, à des exigences de confort plus strictes et à l'informatisation. La ville de Stockholm a été la première zone à fournir un refroidissement urbain respectueux de l'environnement, produit à l'aide de pompes à chauffage et un refroidissement gratuit à partir d'eau de mer froide. Les faits clés sont présentés dans le tableau 13.

	kW/contrat	Mois de semaine/contrat	Nombre de contrats
Bâtiment public	300	300	35
Hôpitaux	1000	1500	5
Universités et écoles	2000	3000	5
Centres d'affaires	1500	1500	15
Industrie et pharmaceutique	500	500	10
Bureaux	500	500	330

Tableau 12. Caractéristiques de RFU Stockholm City [45].

Faits clés

Alimentation installée	170 MW
Énergie	240 GWh/an
Mains	8,6 km
Réseau de distribution	12 km
Pression de fonctionnement	10 bars

Température d'alimentation	+6 °C
Température de retour	+16 °C
Nombre de clients	300

Tableau 13. Faits clés de RFU sur la ville de Stockholm [45].

Répartition

Le refroidissement urbain est transféré à la zone de la ville dans une conduite principale de 8,6 km de long et d'un diamètre de 800 mm. Les conduites sont installées dans les tunnels de canalisations existants et dans le sol. Dans la zone de la ville, un réseau de distribution a été mis en place d'une longueur totale de 12 km. Le réseau de distribution est également installé dans les tunnels et dans le sol.

Principales conclusions

Le système de refroidissement urbain de Stockholm a été lancé en 1995 avec une centrale de refroidissement de 60 MW située à côté d'une pompe à chaleur existante à Värtan. Le système combine refroidissement gratuit et récupération de chaleur, offrant de fortes performances environnementales et économiques. En 1998, un système de stockage d'énergie aquifère a été introduit, principalement chargé d'eau de mer froide, fournissant 25 MW lors des périodes de forte demande. En 2000, une nouvelle centrale excédentaire de 50 MW avec récupération de chaleur a été ajoutée, répondant à la fois aux besoins en chauffage urbain et en refroidissement estival de pointe. Le réseau de distribution a été soigneusement conçu et construit en utilisant des méthodes spécialisées pour minimiser les perturbations du trafic routier.

5.9. RFU combiné avec des électrolyseurs à hydrogène [46]

Aperçu

Dans cette étude de cas, un quartier doté d'un réseau de chauffage et de climatisation urbain est partiellement approvisionné par des technologies à hydrogène. Une alimentation énergétique pour un quartier exemplaire de 6 bâtiments est prévue (le centre énergétique se trouve dans le bâtiment A) (Fig. 41). L'emplacement du quartier est supposé être Berlin (Allemagne) avec un profil de demande représenté dans le tableau 14.

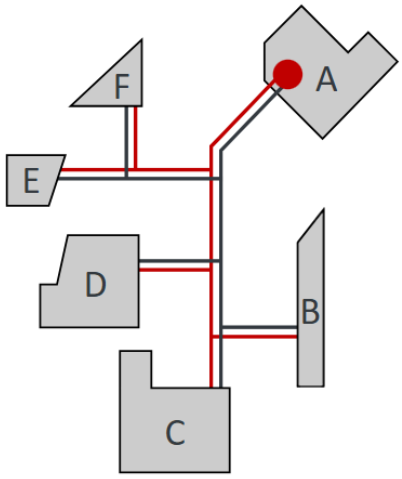


Fig. 41. RFU avec électrolyseurs à hydrogène Allemagne [46].

Profil de la demande

Bâtiment	Utilisation	Surface au sol (m^2)	Chauffage d'espace (MWh)	Eau chaude domestique (MWh)	Refroidissement spatial (MWh)	Électricité (MWh)
A	Hôtel	20,000	1700	640	980	3000
B	Bureau	18,000	1170	144	1062	936
C	Vente au détail	24,500	1593	74	784	2352
D	Musée	16,500	1073	83	578	859
E	Théâtre	6,700	503	40	101	563
F	Restaurant	2,500	188	125	50	358

Tableau 14. Caractéristiques du RFU pour chaque bâtiment (cas électrolyseurs à hydrogène) [46].

La fig. 42 montre la demande de chaleur et la fig. 43 la demande d'électricité

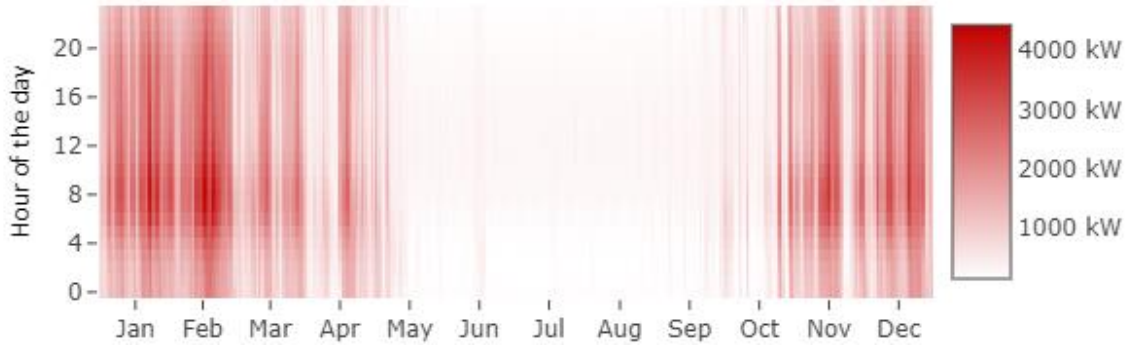


Fig. 42. Demande thermique (cas électrolyseurs à hydrogène) [46].

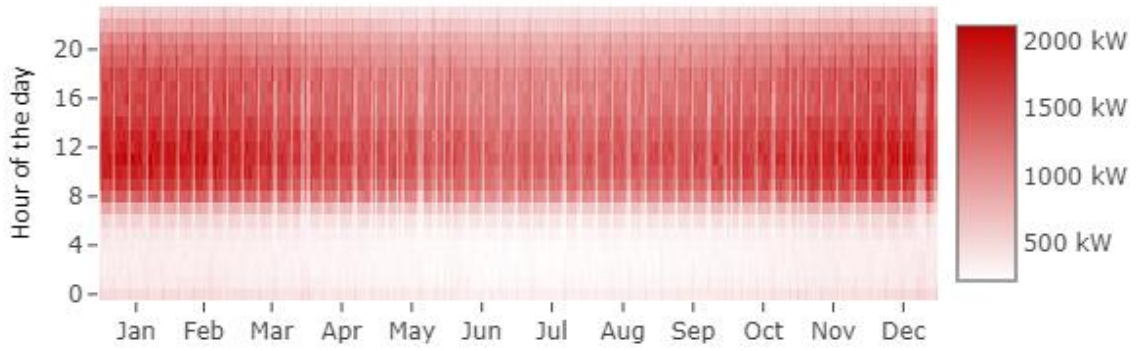


Fig. 43. Demande d'électricité (cas électrolyseurs à hydrogène) [46].

Conception du centre énergétique

1. Les technologies à hydrogène soutiennent le chauffage et la climatisation dans le quartier, avec une connexion de 3 MW à un réseau de chauffage urbain existant.
2. Un électrolyseur utilise l'électricité PV excédentaire pour produire de l'hydrogène, qui est injecté dans le réseau de gaz naturel, la chaleur fatale étant récupérée pour le chauffage urbain (Fig. 44).

3. Les refroidisseurs à compression assurent le refroidissement, et la capacité optimale du système photovoltaïque est de 58 800 m², couvrant 62 % des besoins électriques du quartier (Fig. 45).
4. 92,1 % de l'approvisionnement en chaleur provient du réseau de chauffage urbain, tandis que 7,9 % sont couverts par la chaleur fatale issue de l'électrolyse.
5. Les émissions de CO_2 du quartier totalisent 4 370 tonnes métriques par an.

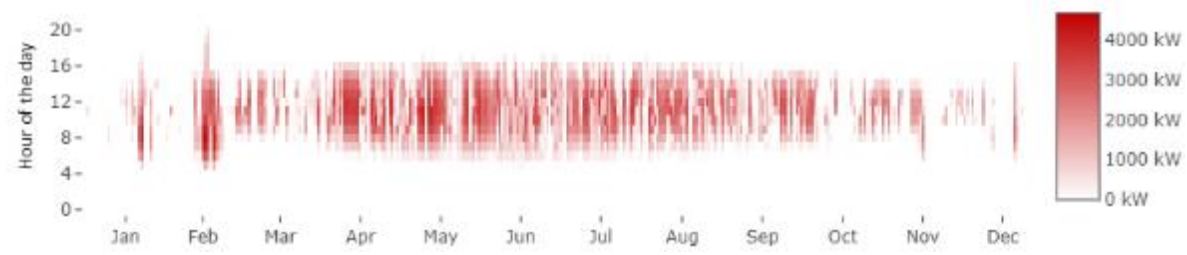


Fig. 44. Alimentation en hydrogène (cas électrolyseurs à hydrogène) [46].

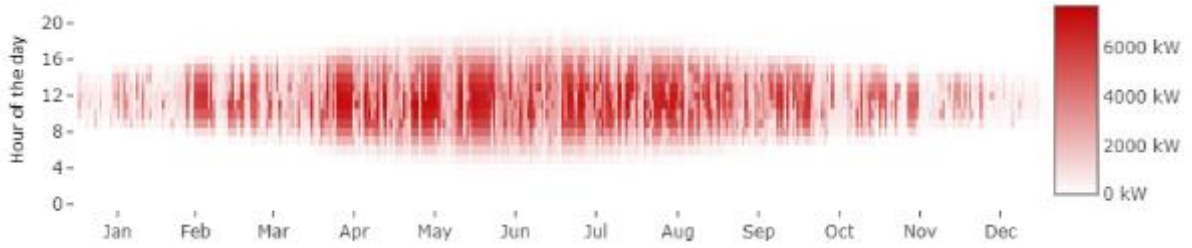


Fig. 45. Production d'électricité photovoltaïque (cas électrolyseurs à hydrogène) [46].

5.10. RFU pour les complexes hôteliers [47]

Contexte

Ce projet énergétique d'un quartier à Punta Cana, en République dominicaine, est largement reconnu, notamment dans la zone touristique de l'est. BROAD a fourni huit refroidisseurs à eau chaude à étage unique qui utilisent la chaleur fatale des générateurs Wartsila dans une centrale à fioul lourd. Le système délivre 19 MW de refroidissement en transférant de l'eau chaude sous pression à 120°C sur une distance de 4 km vers des climatiseurs desservant cinq hôtels. Le refroidissement continu est essentiel en raison du climat tropical, qui exige également des normes strictes de performance et de stabilité. Le succès du projet a été reconnu par CEPM et suscité l'intérêt des entreprises énergétiques aux États-Unis et en Amérique latine, ouvrant de nouvelles opportunités de collaboration.

Concept de conception de système (Fig. 46)

1. Le système fournit 17,58 MW d'eau froide et d'eau chaude sanitaire (ECS) aux hôtels voisins.
2. La chaleur fatale provenant des gaz d'échappement des moteurs diesel et de l'eau de refroidissement (6 MWe chacun) est utilisée pour le chauffage et la climatisation.
3. De l'eau chaude à haute température à 248°F (120°C) est produite par la centrale électrique et envoyé dans des hôtels pour entraîner des refroidisseurs à absorption à un seul étage.
4. Après refroidissement, l'eau chaude à 158°F (70°C) est utilisée pour générer de l'ECS avant de revenir à la centrale électrique.
5. Une baisse de température de 50°C optimise l'utilisation de la chaleur, permettant à une seule boucle de répondre à la fois aux besoins de refroidissement et de l'ECS.

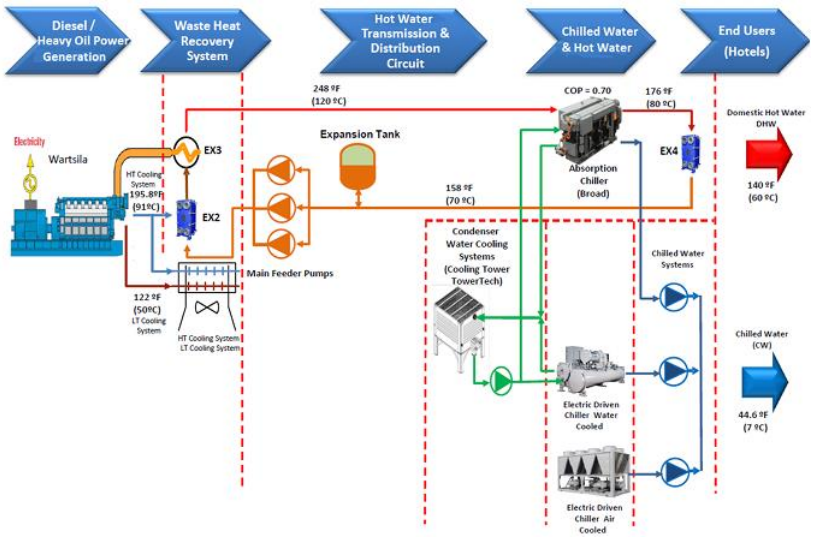


Fig. 46. Concept de conception système pour les complexes hôteliers RFU [47].

Aspects économiques et environnementaux

1. Réduction de 25 % de la consommation d'énergie électrique dans les stations balnéaires par rapport aux méthodes de refroidissement traditionnelles.
2. Auparavant, 34 % de la facture d'électricité des stations était consacrée à la climatisation, mais la cogénération réduisait la dépendance au réseau.
3. Le projet a éliminé le besoin de chaudières domestiques, réduisant ainsi la consommation de carburant à zéro.
4. L'énergie fatale a été réutilisée efficacement, couvrant à la fois les besoins en climatisation et en hydratation, profitant à la fois aux stations et aux services publics.
5. 25 % de l'énergie thermique a été récupérée, réduisant la consommation de combustible de 35 740 barils de HFO et 32 881 barils de GPL par an.
6. Les émissions de CO_2 ont été réduites de plus de 28 872 tonnes métriques par an, témoignant d'avantages environnementaux significatifs.

Ce projet représente l'organisation énergétique la plus innovante des Caraïbes, exploitant efficacement l'énergie thermique fatale et la consommation en cascade. Les hôtels bénéficient de coûts d'exploitation réduits, d'une compétitivité accrue et d'une consommation d'énergie plus durable. En optimisant l'utilisation de l'énergie thermique, le système libère de la capacité électrique pour soutenir les développements futurs et les nouvelles installations. Dans l'ensemble, le projet contribue à la croissance économique régionale tout en favorisant la durabilité à long terme.

5.11. Conclusions

Le tableau 15 présente les facteurs clés externes de réussite du RFU basés sur les études de cas, et le tableau 16 est le même pour les facteurs internes.

Facteurs clés de réussite (externes)	Description
Environnement politique national et réglementaire adéquat	La politique énergétique nationale et l'environnement réglementaire fournissent des bases adéquates et des incitations pour le développement des systèmes RCF

Soutien financier direct/indirect	Les projets RCF bénéficient de subventions directes/indirectes existantes
Politique locale axée sur la cohérence avec l'urbanisme	Les autorités locales promeuvent le RCF dans leur stratégie d'approvisionnement énergétique et climatique et intègrent la planification thermique dans leurs projets de développement urbain
Alignement des intérêts / Maturité de la coopération	Les autorités publiques au niveau national et local, les organismes de régulation, les utilisateurs finaux, la société RCF et d'autres acteurs locaux coopèrent de manière efficace pour obtenir un service de qualité et un approvisionnement en chaleur et froid durable et rentable

Tableau 15. Facteurs externes clés de réussite du RFU.

Facteurs clés de réussite (internes)	**Description**
Disponibilité et pertinence des ressources locales	Le système RCF dépend en grande partie des ressources locales disponibles telles que les sources d'énergie renouvelable
Développement global du projet	Le système RCF a été conçu, développé et mis en œuvre selon une approche globale et fluide, visant à obtenir un approvisionnement en chaleur/froid de haute qualité, économique et durable.
Compétitivité des prix face aux solutions énergétiques alternatives	Les prix des RCF sont compétitifs par rapport aux solutions énergétiques alternatives disponibles sur le marché. Cette compétitivité des prix peut être renforcée grâce à une conception optimisée du système, à des procédures concurrentielles sur le marché ou en permettant la concurrence entre différentes solutions d'alimentation chaleur/froid.
Production flexible de chaleur et de froid	Une production flexible permet de meilleures rentabilités, principalement grâce à une optimisation dynamique de l'approvisionnement. Cela peut être réalisé grâce à un mix énergétique diversifié et complémentaire, l'utilisation de CHP et des pratiques renforcées de montée en puissance/cyclage, la connexion des marchés de l'électricité et du chauffage, etc.
Combinant innovation technique et non technique	Le système RCF adopte et fertilise l'innovation à tous les niveaux : de l'utilisation de technologies de pointe aux nouveaux modes de gouvernance,

	en maintenant une approche à long terme lors de la prise de décisions stratégiques.

Tableau 16. Facteurs clés internes de réussite de la RFU.

Références

[1] Marina, A., Bak-Jensen, B., Schaltz, E., & Floristeanu, D. (2021). Heat pump technologies for industrial applications. *Energy*, *231*, Article 120822. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120822

[2] Euroheat & Power. (2023). District Heating and Cooling: A key to the energy transition. https://www.euroheat.org/knowledge-hub.html

[3] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (9th ed.). Wiley. https://www.wiley.com/en-us/Fundamentals+of+Engineering+Thermodynamics%2C+9th+Edition-p-9781119391388

[4] Shin, M. S., Jang, D. S., Jung, D., & Kim, Y. (2019). *Energy and exergy analysis of a waste heat recovery heat pump system for industrial applications*. Applied Thermal Engineering, 151, 107-116. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.096

[5] Mateu-Royo, J., Arpagaus, C., Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., & Bless, F. (2020). *Advanced strategy to integrate high-temperature heat pumps into trans-critical CO2 refrigeration systems*. Applied Thermal Engineering, 182, 116154. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116154

[6] El Samad, T., Żabnieńska-Góra, A., Jouhara, H., & Sayma, A. I. (2024). *A review of compressors for high temperature heat pumps*. Thermal Science and Engineering Progress, 51, 102603. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102603

[7] Geotrainet. (2013). *Shallow Geothermal Systems: European Curriculum as the Basis for Business and Education*. https://geotrainet.eu/

[8] Mateu-Royo, J., Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., Peris, B., Molés, F., & Amat-Albuixech, M. (2021). *Multi-objective optimization of a high temperature heat pump (HTHP) for industrial waste heat recovery*. Energy Conversion and Management, 245, 114540. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114540

[9] Stanford, H. W. (2020). *Analysis and design of heating, ventilating, and air-conditioning systems* (2.ª ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780429451157

[10] Kiron Hydraulic Needs. (2024). *Hydraulic solutions and industrial components for high-pressure systems*. https://kironhydraulic.com/

[11] Alpine Intel. (2019, 13 July). *Water-cooled chiller diagram*. https://www.alpineintel.com/resources/chiller-basics-water-cooled-vs-air-cooled/

[12] European Committee for Standardization. (2022). *Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling, commercial and process cooling - Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance* (EN 14825:2022). https://www.en-standard.eu/une-en-14825-2022-air-conditioners-liquid-chilling-packages-and-heat-pumps-with-electrically-driven-compressors-for-space-heating-and-cooling-commercial-and-process-cooling-testing-and-rating-at-part-load-conditions-and-calculation-of-seasonal-performance/

[13] Wang, J., Wang, R. Z., & Zhai, X. Q. (2024). *Advances in absorption refrigeration and heat pump technologies for low-grade thermal energy utilization*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 192, 114210. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114210

[14] Indian Institute of Technology Kharagpur. (2024). *Comparison between vapor compression and absorption refrigeration systems*. NPTEL - Mechanical Engineering. https://www.iitkgp.ac.in/

[15] Dincer, I., & Rosen, M. A. (2021). *Thermal Energy Storage: Systems and Applications* (3rd ed.). Wiley. https://www.wiley.com/en-us/Thermal+Energy+Storage%3A+Systems+and+Applications%2C+3rd+Edition-p-9781119713098

[16] ASHRAE. (2013). *ASHRAE Handbook: Fundamentals* (I-P ed.). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook

[17] Kiron Hydraulic Needs. (2024). *Central energy plant operation: Day-time and night-time tank charge cycles in mass thermal energy storage systems*. https://kironhydraulic.com/

[18] Turgut, M. S., & Turgut, E. T. (2019). *Thermal design and optimization of a heat pump system using a new algorithm*. International Journal of Refrigeration, 106, 215-224. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.06.027

[19] Alpine Intel. (2022, 23 June). *The evolution of refrigerants: Past, present, and future*. https://www.alpineintel.com/resources/the-evolution-of-refrigerants-past-present-and-future/

[20] International Institute of Refrigeration. (2019). *The role of refrigeration in the global economy*. https://iifiir.org/en/resources/notes-informatives/the-role-of-refrigeration-in-the-global-economy

[21] Kuo, C. P., & Chien, C. H. (2021). *Analysis of temperature glide effect on the performance of heat pump systems using zeotropic refrigerant mixtures*. Energies, 14(11), 3124. https://doi.org/10.3390/en14113124

[22] Technical University of Denmark (DTU). (2024). *Department of Energy Engineering: Research and innovation in thermal energy systems and heat pumps*. https://www.energy.dtu.dk/

[23] Bitzer. (2024). *Refrigerant Report 21*. Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH. https://www.bitzer.de/shared_media/documentation/a-501-21.pdf

[24] ASHRAE. (2022). *ANSI/ASHRAE Standard 34-2022: Designation and safety classification of refrigerants*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-34

[25] International Institute of Refrigeration (IIR). (2024). *Guideline for Life Cycle Climate Performance*. https://iifiir.org/en/resources/scientific-and-technical-publications/guidelines

[26] IEA Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies (HPT). (2024). *Global Warming Potential (PRG) of refrigerants: A comparison of 100-year and 20-year horizons*. https://heatpumpingtechnologies.org/

[27] GlobalSpec. (2024). *Total Equivalent Warming Impact (TEWI) calculation and analysis for modern refrigerants*. Engineering360. https://www.globalspec.com/

[28] Höges, C., Müller, D., & Bardow, A. (2023). *Life cycle assessment of refrigerants: A comprehensive comparison of environmental impacts beyond global warming*. International Journal of Refrigeration, 149, 120-131. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.01.018

[29] United Nations Environment Programme. (2016). *The Kigali Amendment to the Montreal Protocol: HFC phase-down*. https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol/amendments/kigali-amendment-2016

[30] European Commission. (2014). *Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council on fluorinated greenhouse gases*. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014R0517

[31] Lelieveld, J., & Pöschl, U. (2022). *The Kigali Amendment to the Montreal Protocol: A crucial step in mitigating climate change from HFC emissions*. Environmental Research Letters. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac88f2

[32] European Union. (2014, April 16). *Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006*. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014R0517

[33] European Union. (2024, February 7). *Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014*. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R0573

[34] Behringer, D., Heydel, F., Gschrey, B., & Papst, I. (2021). *Persistent degradation products of halogenated refrigerants and blowing agents in the environment: Type, environmental concentrations, and fate with particular regard to new halogenated substitutes with low global warming potential*. German Federal Environment Agency (Umweltbundesamt). https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/persistent-degradation-products-of-halogenated

[35] Norwegian Environment Agency. (2023). *PFAS restriction proposal: Annex XV restriction report*. https://www.miljodirektoratet.no/en/publications/2023/february-2023/pfas-restriction-proposal/

[36] Alajmi, A. F., & Zedan, A. (2020). *Analysis of thermal energy storage for a district cooling plant: Case study of a large-scale application*. Energy and Buildings, 224, 110258. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110258

[37] Strategy&. (2014). *District cooling: A climate-smart energy solution for the GCC*. PwC. https://www.strategyand.pwc.com/me/en/reports/district-cooling.html

[38] James Cook University (JCU). (2026). *District cooling network and thermal energy storage: Case study of the Townsville campus sustainability initiative*. https://www.jcu.edu.au/

[39] Zubi Labs. (2021). *Barrio La Pinada: Master plan and sustainability strategy for a sustainable eco-district in Paterna*. https://www.barriolapinada.es/

[40] Bristol City Leap. (2024). *Bristol heat network: Redcliff extension and the transition to low-carbon district heating*. https://www.bristolcityleap.co.uk/

[41] ST3 (Societat de Tractament de Trànsit Tèrmic). (2024). *Parc de l'Alba District Heating & Cooling: Polygeneration and thermal energy storage for the Sincrotró ALBA area*. https://www.st3.cat/

[42] Districlima. (2024). *The Barcelona District Heating and Cooling Network: Energy efficiency and waste-to-energy integration in the 22@ and Fòrum areas*. https://www.districlima.com/

[43] Stockholm Exergi. (2024). *District heating and cooling in Greater Stockholm: Deep sea water cooling and large-scale heat pump integration*. https://www.stockholmexergi.se/

[44] Kanbur, B. B., Xiang, L., Dubey, S., & Duan, F. (2017). *Cold energy recovery from liquefied natural gas (LNG) regasification process: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79, 1171-1188. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.006

[45] Stockholm Exergi. (2023). *District cooling: The cold soul of Stockholm's energy system*. https://www.stockholmexergi.se/en/district-cooling/

[46] nPro. (2024). *District energy simulation and design: Network topology for heating and cooling systems*. https://www.npro.energy/

[47] International Finance Corporation. (2021). *Creating markets in the Dominican Republic: District cooling for a sustainable tourism sector*. World Bank Group. https://www.ifc.org/en/insights-reports/2021/dominican-republic-country-private-sector-diagnostic