Module 4 : Réseaux de froid Production combinée de chaleur et froid, technologies de production de froid

SHaKE – Sharing Heat and Knowledge on Energy Communities
Erasmus+ KA220-HED Cooperation Partnerships in Higher Education
Insitution : Universitat Jaume I de Castellón
Auteurs: Dr. Adrián Mota-Babiloni et Ghad Alarnaot-Alarnaout
Date: Mai 2026
Version 1.1

SHaKE
Sharing Knowledge on Energy Communities



INDEX

1. Production combinée de chaleur et de froid

1.1. Principes de chauffage et de climatisation

1.2. Applications simultanées de chauffage et de refroidissement

1.3. Technologie pour pompes à chaleur et refroidisseurs

1.4. Technologie actuelle des pompes à chaleur pour la production simultanée de chauffage et de refroidissement

1.5. Intégration des pompes à chaleur, des configurations et des réfrigérants

1.6. Déchets et chaleur renouvelable

1.7. Conclusion

1.8. Exemple de production combinée chauffage et froid

2. Technologies de production à froid

2.1. Refroidisseurs

2.2. Machines de réfrigération à absorption

INDEX

2.3. Stockage d’énergie thermique
2.4. Combinaison de systèmes mécaniques et de systèmes d’absorption à énergie thermique
2.5. Conclusions
2.6. Exemple de technologies de production à froid
3. Réfrigérants
3.1. Introduction aux réfrigérants
3.2. Histoire et évolution
3.3. Classifications et désignations de sécurité
3.4. Impact environnemental
3.5. Réfrigérants actuels et leurs applications
3.6. Avenir des réfrigérants
3.7. Conclusions

INDEX

4. Aspects économiques et environnementaux

4.1. Introduction aux aspects économiques et environnementaux

4.2. Demande de densité

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

4.4. Impact environnemental du refroidissement urbain

4.5. Optimisation des technologies de refroidissement urbain

5. Projets réalisés et études de cas

5.1. DHC Barrio La Pinada (Valence, Espagne)

5.2. DHC Barcelone (Espagne)

5.3. Récupération de l'énergie froide DCN issue de la vaporisation de gaz naturel liquéfié (Italie)

5.4. Conclusion

1. PRODUCTION COMBINÉE DE CHALEUR ET DE FROID

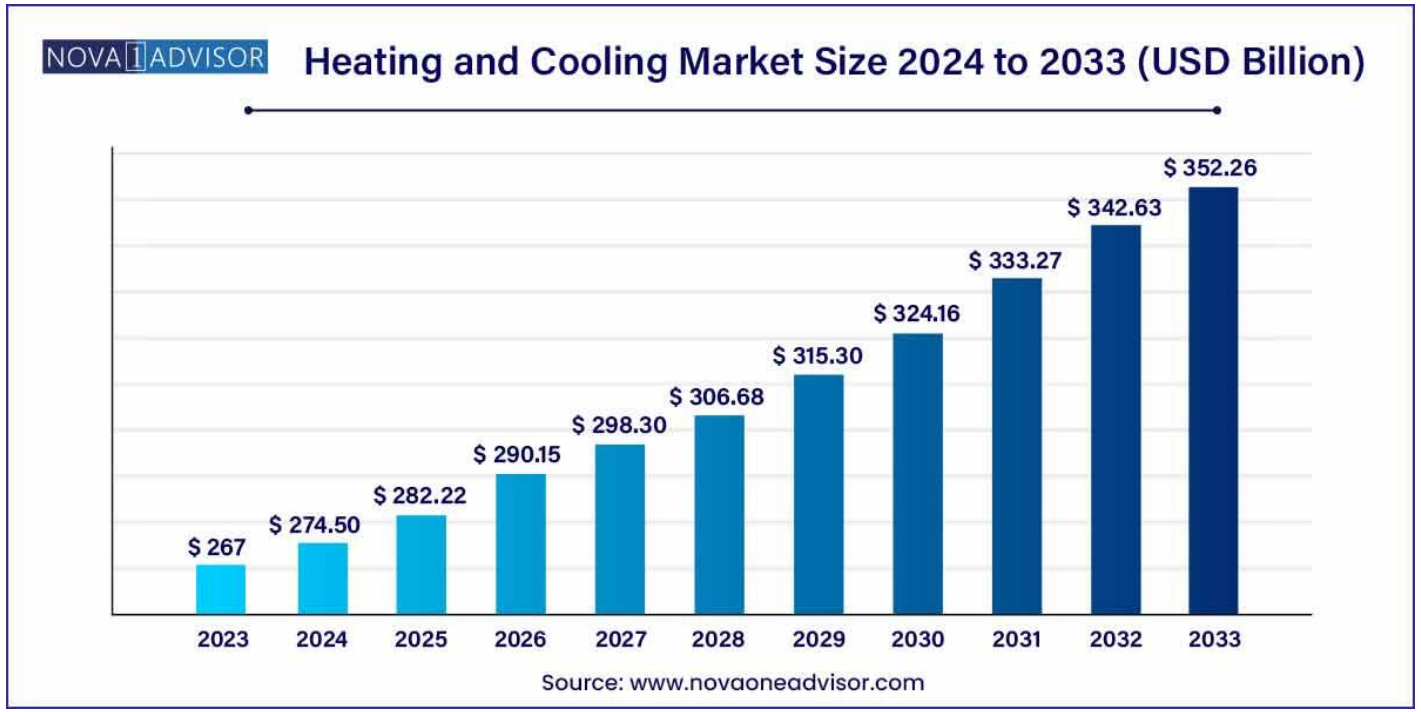


SHaKE

1.1. PRINCIPES DE CHAUFFAGE ET DE CLIMATISATION

Introduction

- Le chauffage et la climatisation sont essentiels pour le confort en hiver et en été.
- Les bâtiments nécessitent un chauffage pour les services d'eau chaude, généralement à des températures différentes.
- Les plus grands consommateurs de chauffage et de climatisation se trouvent dans le secteur industriel.
- Le refroidissement est également crucial dans la transformation, le stockage et le transport des aliments.
- Les besoins en température varient considérablement : le refroidissement peut descendre jusqu'à -150 °C, et le chauffage peut atteindre jusqu'à 1000 °C.

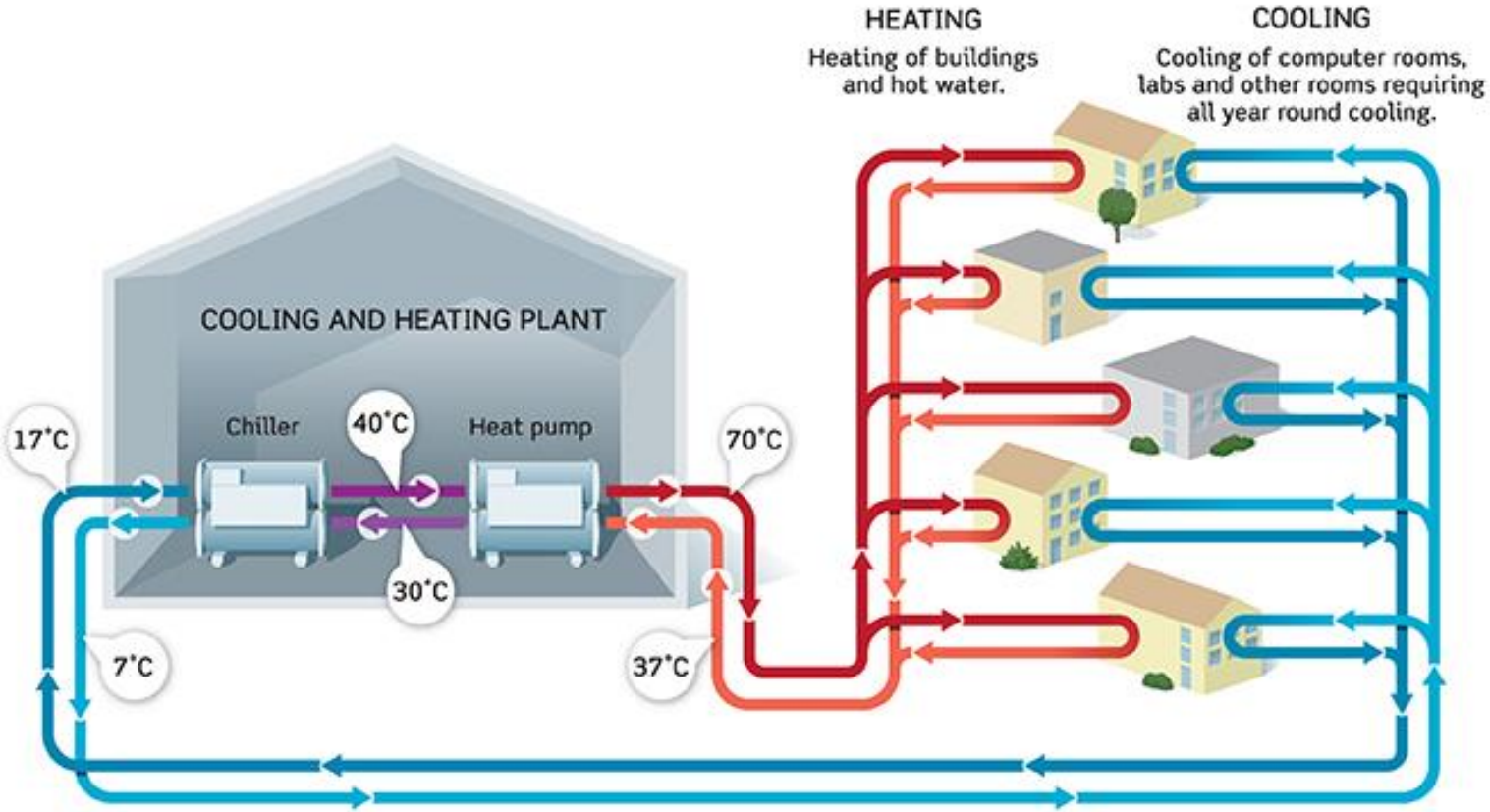


Nova One Advisor. (n.d.). Heating and cooling market (By category: Heating and cooling; By application: Residential, Industrial, and Service) - Global industry analysis, size, share, growth, trends, regional outlook, and forecast 2024–2033. https://www.novaoneadvisor.com/report/heating-and-cooling-market

1.1. PRINCIPES DE CHAUFFAGE ET DE CLIMATISATION

Introduction

- Facteurs techniques clés : durabilité, entretien, simplicité, taille et sécurité.
- L'efficacité est de plus en plus importante pour des raisons de coût et d'environnement.
- Les réseaux de chauffage et de climatisation urbains améliorent l'efficacité et la performance économique.
- Ils distribuent la chaleur ou le refroidissement à partir de sources centrales ou distribuées.
- Ces réseaux optimisent les performances des pompes à chaleur et des refroidisseurs.
- Peut servir à préchauffer ou à refroidir des sources/évacuations



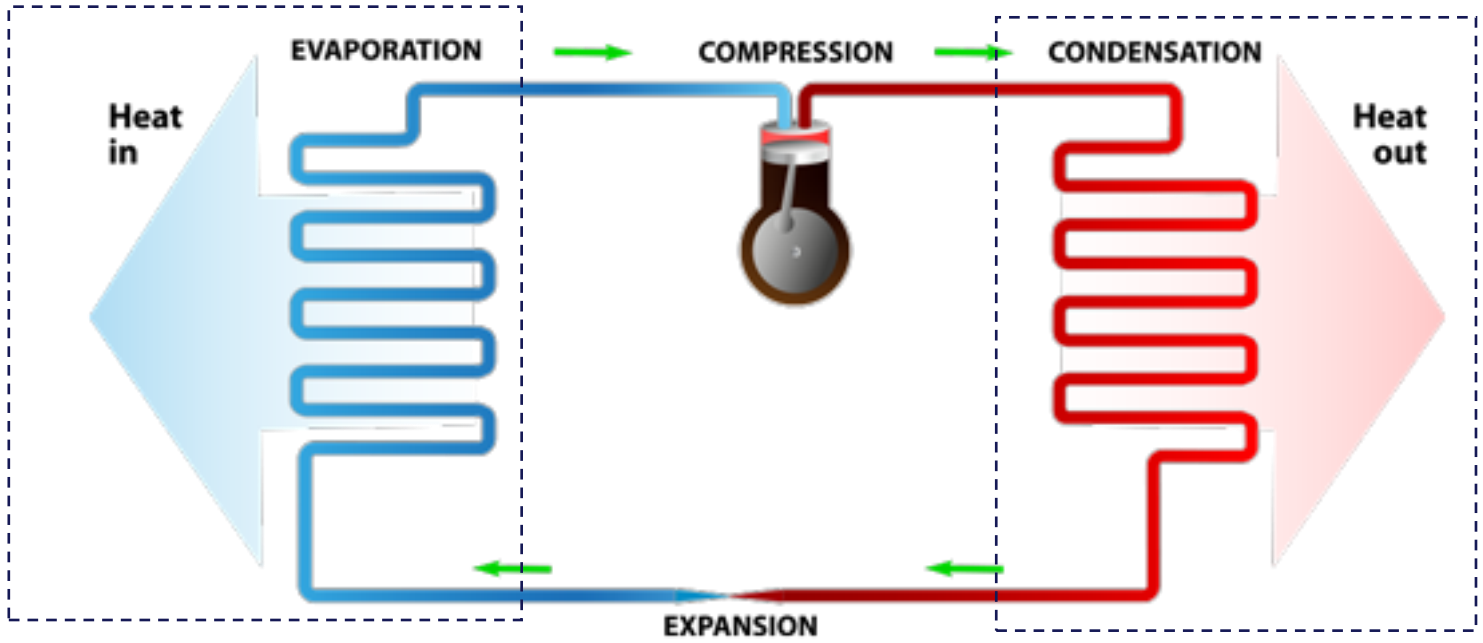
Connections of DCN and DHN

PDC Center for High Performance Computing. (n.d.). Heat re-use. KTH Royal Institute of Technology. https://www.pdc.kth.se/hpc-services/infrastructure/heat-re-use-1.737781

1.1. PRINCIPES DE CHAUFFAGE ET DE CLIMATISATION

Type de fonctionnement des pompes à chaleur

- Chauffage : Extrait la chaleur d'une source et la remonte à un niveau de température utile
- Refroidissement : Rejette la chaleur indésirable vers un dissipateur thermique
- Chauffage et refroidissement simultanés : Récupère la chaleur des processus de refroidissement pour répondre aux besoins en chauffage
- Avantage : Maximise l'efficacité énergétique en utilisant une énergie thermique qui serait autrement gaspillée

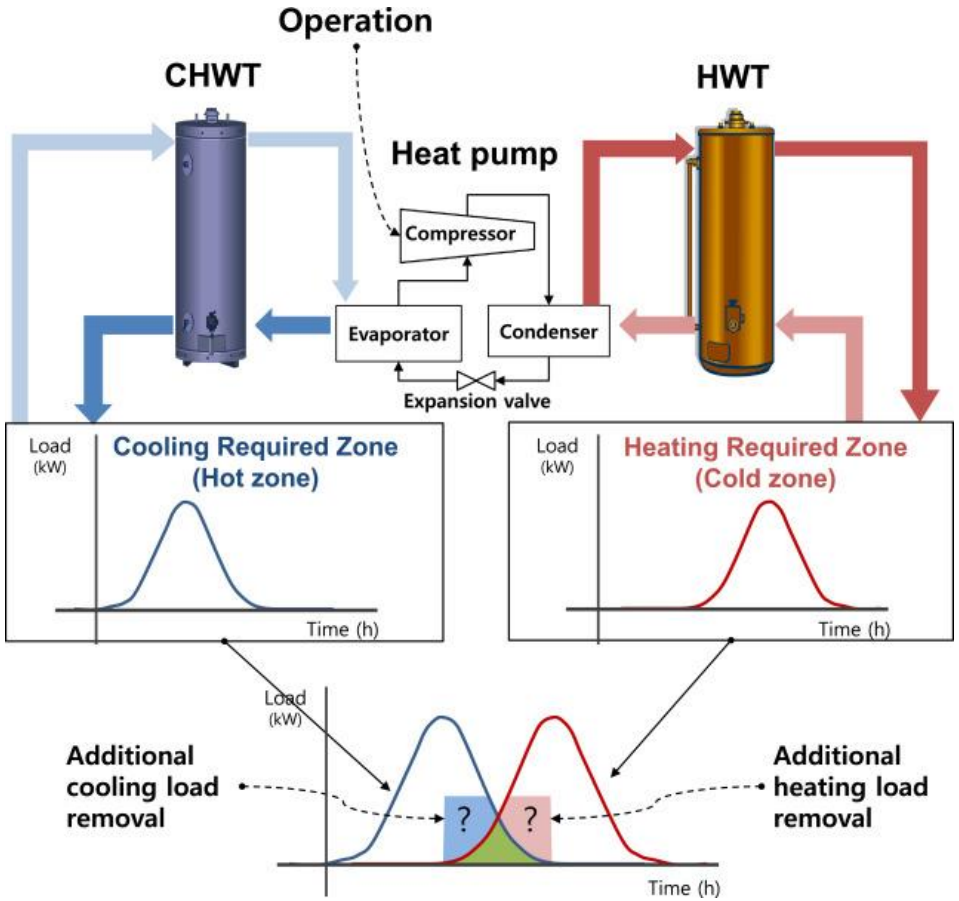


SPRSUN. (n.d.). Simple diagram & operation of heat pumps: Pump up your heat pump knowledge. https://sprsunheatpump.com/Simple-Diagram-Operation-of-Heat-Pumps-Pump-up-Your-Heat-Pump-Knowledge-id41518747.html

1.2. APPLICATIONS SIMULTANÉES DE CHAUFFAGE ET DE REFROIDISSEMENT

Principe de chauffage et refroidissement simultanés (SHC)

- La chaleur est extraite du côté refroidissement (évaporateur). Le compresseur porte la chaleur récupérée à un niveau de température plus élevé
- Un refroidissement et un chauffage utiles sont produits simultanément
- La chaleur récupérée est fournie aux besoins de chauffage au lieu d'être rejetée vers l'environnement



Dae Uk Shin, Seong Ryong Ryu, Kwang Woo Kim, Simultaneous heating and cooling system with thermal storage tanks considering energy efficiency and operation method of the system, Energy and Buildings, Volume 205, 2019, 109518, ISSN 0378-7788, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109518.

1.2. APPLICATIONS SIMULTANÉES DE CHAUFFAGE ET DE REFROIDISSEMENT

Avantages du SHC

Efficacité énergétique : En récupérant et réutilisant la chaleur résiduelle, les systèmes SHC réduisent considérablement la consommation d'énergie par rapport aux systèmes de chauffage et de refroidissement séparés.

Empreinte carbone réduite : Utiliser la chaleur résiduelle minimise la dépendance aux combustibles fossiles, diminuant ainsi les émissions de gaz à effet de serre.

Gains économiques : Le partage des infrastructures de chauffage et de climatisation réduit les coûts de capital et d'exploitation du réseau.

Flexibilité : Les systèmes SHC sont adaptables aux besoins variables de chauffage et de climatisation, ce qui les rend idéaux pour les projets à usage mixte (ex., zones résidentielles, commerciales et industrielles).

Gestion des charges de pointe : Les systèmes SHC atténuent les pics de demande énergétique en répondant simultanément aux besoins de chauffage et de refroidissement.

Défis du SHC

Investissement initial : coûts initiaux élevés pour les infrastructures et les systèmes de pompes à chaleur.

Conception de systèmes complexes : nécessite une ingénierie et un ajustement précis pour équilibrer simultanément les charges de chauffage et de refroidissement.

Stockage d'énergie : Des systèmes TES efficaces sont essentiels pour gérer les besoins incompatibles en chauffage et en climatisation au fil du temps.

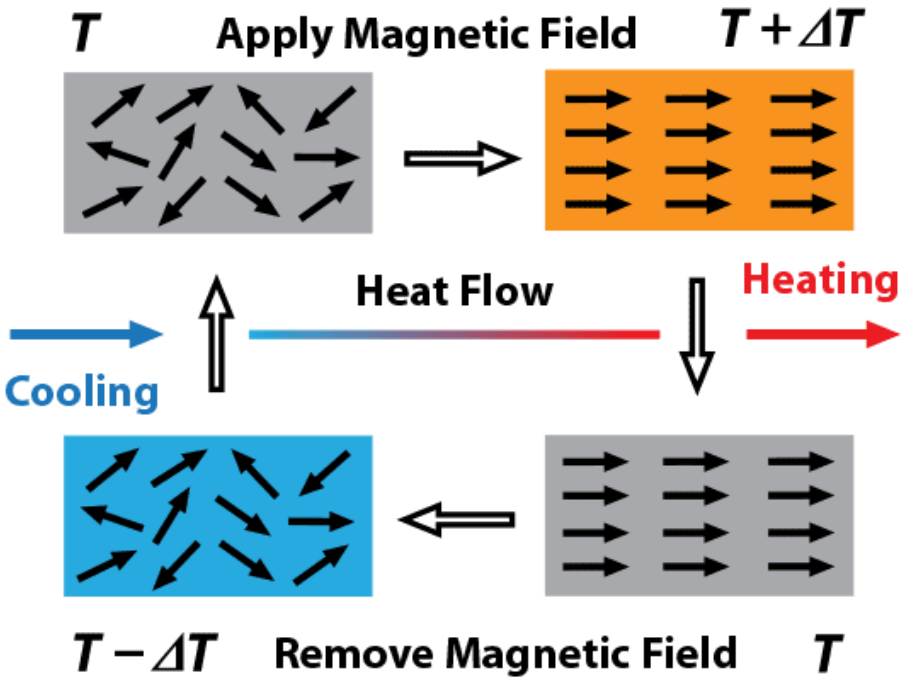
Intégration avec les énergies renouvelables : Associer les systèmes SHC à des sources d'énergie renouvelable (ex., solaire, thermique ou géothermique) peut améliorer la durabilité mais nécessite une planification minutieuse.

Contrôle : Le chauffage et la climatisation doivent toujours être consommés, transportés, stockés ou dissipés afin d'assurer un contrôle adéquat des températures.

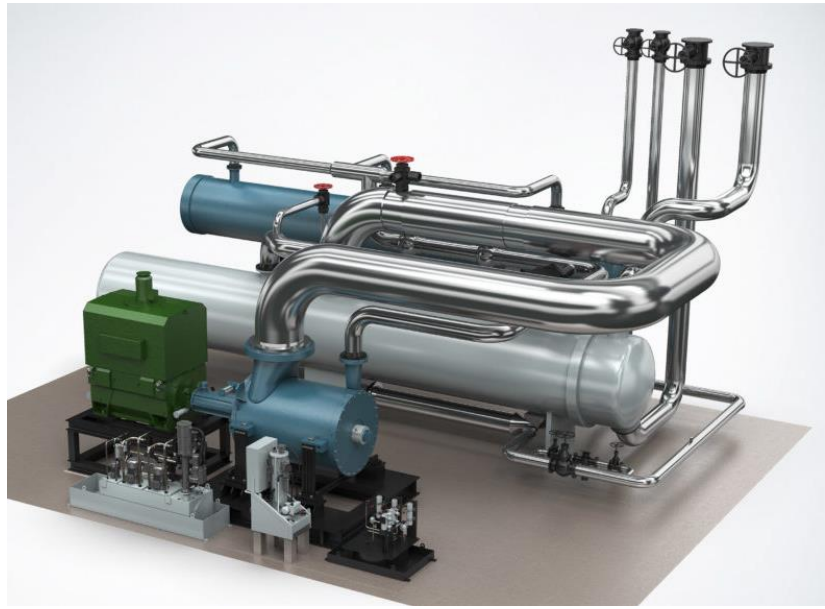
1.3. TECHNOLOGIES POUR POMPES À CHALEUR ET REFROIDISSEURS

Technologies émergentes et tendances futures

1. Réfrigérants naturels
2. Pompes à chaleur à haute température
3. Numérisation et IoT
4. Refroidissement thermoélectrique et magnétocalorique
5. Systèmes hybrides
6. Intégration avec les systèmes énergétiques de district



Pompe à chaleur/ refroidisseur de liquide magnéto-calorique



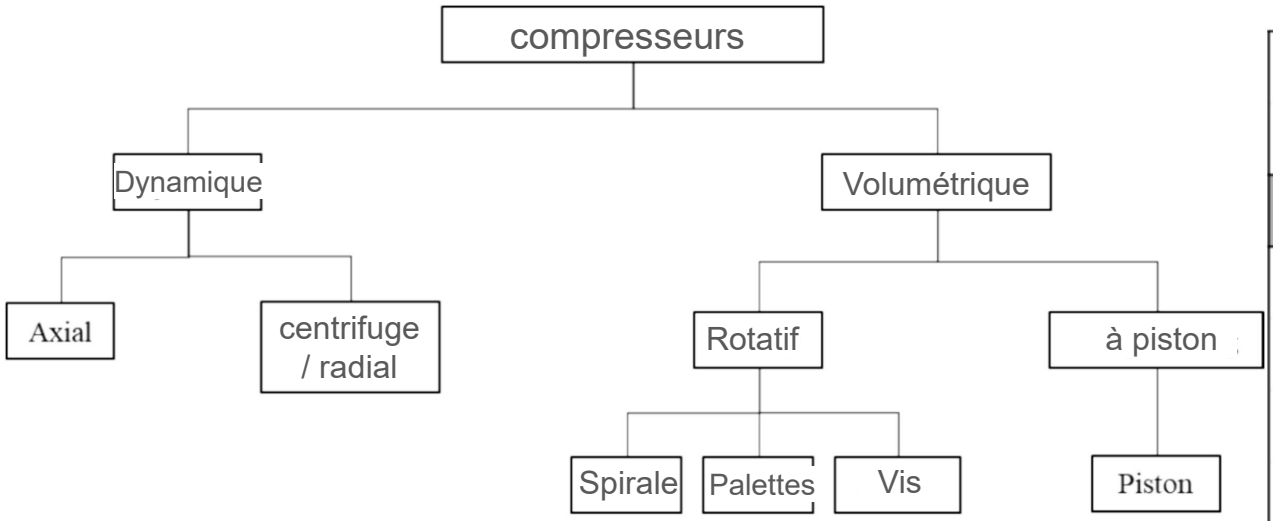
Pompe à chaleur haute température

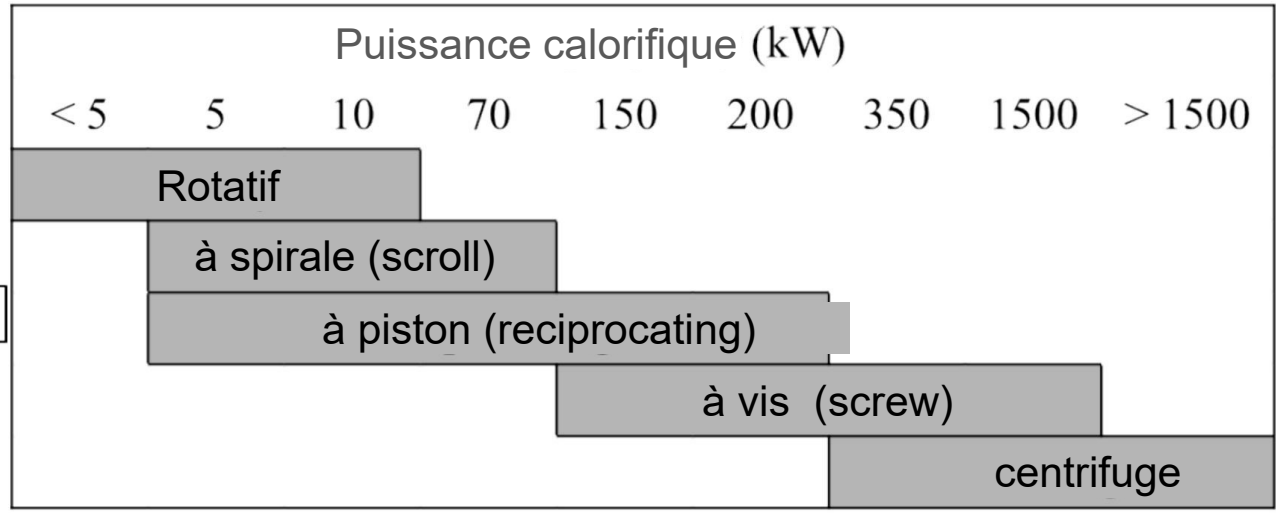
Access, Inc. (2023, September 14). The future of air conditioning. https://access-inc.com/the-future-of-air-conditioning/

PV Magazine. (2022, March 29). Large-scale high-temperature heat pump for district heating. https://www.pv-magazine.com/2022/03/29/large-scale-high-temperature-heat-pump-for-district-heating/

1.4. TECHNOLOGIES ACTUELLES

Compresseurs





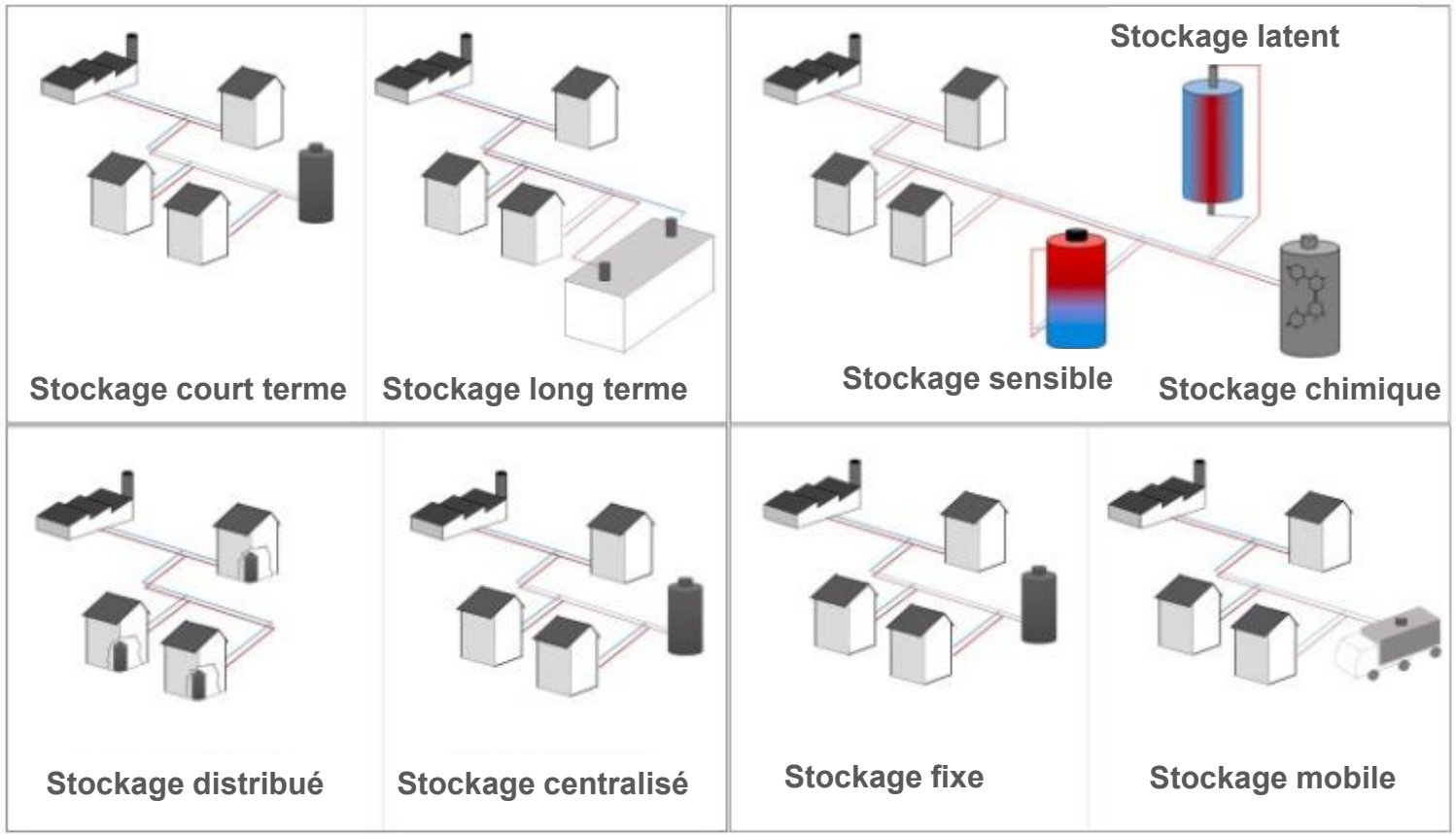
El Samad, T., Żabnieńska-Góra, A., Jouhara, H., & Sayma, A. I. (2024). A review of compressors for high temperature heat pumps. Thermal Science and Engineering Progress, 51, 102603. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102603

1.4. TECHNOLOGIES ACTUELLES

Stockage d'énergie thermique

1. Stockage thermique à court/long terme
2. Stockage thermique sensible/latente/chimique
3. Stockage thermique distribué/localisé
4. Stockage thermique fixe/mobilisé

Les stockages utilisés dans les réseaux de chaleur peuvent être classés selon différents critères



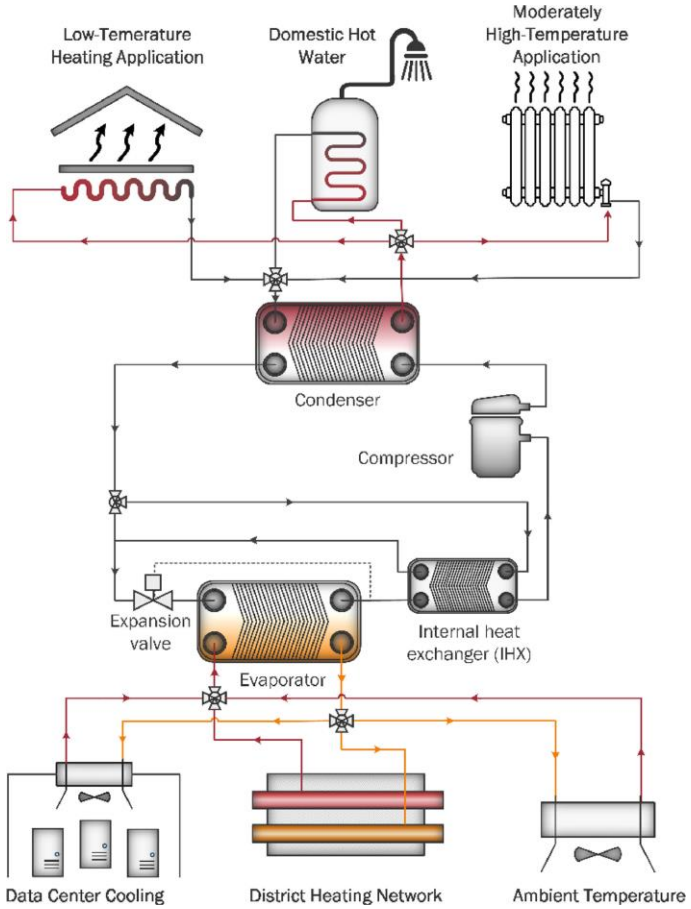
Elisa Guelpa, Vittorio Verda, Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review, Applied Energy, Volume 252, 2019, 113474, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113474.

1.5. INTÉGRATION

Possibilités d'intégration

Une combinaison de consommation de chauffage et de climatisation urbaine et industrielle par une pompe à chaleur avec la possibilité d'une production simultanée.

	Application	Temperature Range	Traditional Technology
Heat source	Ambient air	0 – 30 °C (15 °C)	Several technologies
	Data cooling center	20 – 50 °C (35°C)	R-410A based cooling technology
	Low-temperature district heating	40 – 70 °C (55 °C)	Mix technologies (waste-to-heat, gas boiler, coal, etc.)
Heat sink	Low-temperature space heating	35 – 50 °C	Solar, electric or gas boiler
	Domestic hot water	45 – 65 °C	Electric or gas boiler
	Industrial processes / Heating radiators	75 – 90 °C	Centralised gas burned system



Carlos Mateu-Royo, Adrián Mota-Babiloni, Joaquín Navarro-Esbrí, Ángel Barragán-Cervera, Comparative analysis of HFO-1234ze(E) and R-515B as low GWP alternatives to HFC-134a in moderately high temperature heat pumps, International Journal of Refrigeration, Volume 124, 2021, Pages 197-206, ISSN 0140-7007, https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.12.023.

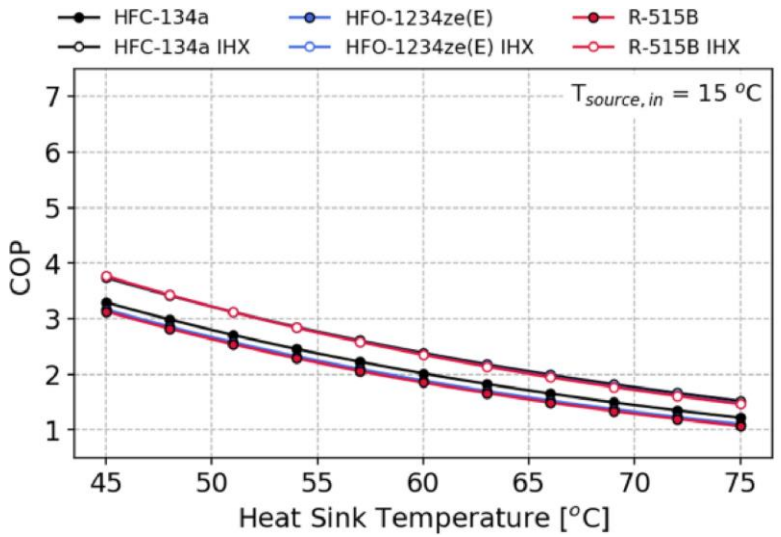
1.5. INTÉGRATION

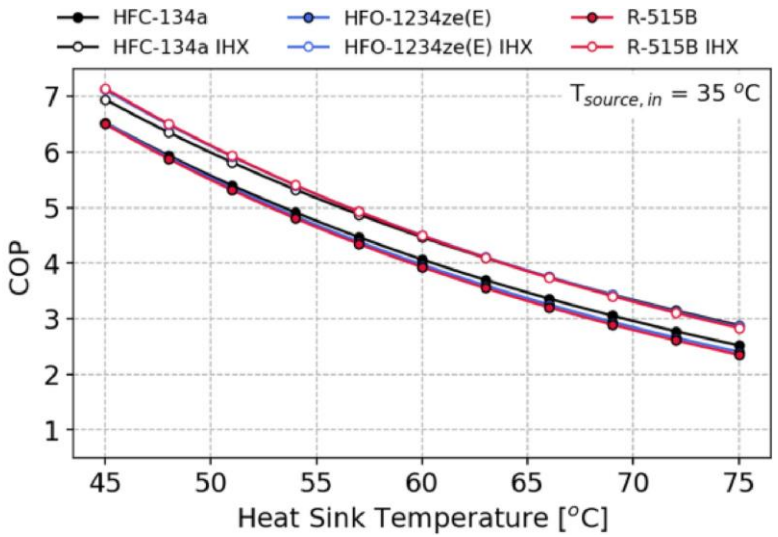
Influence des températures opérationnelles

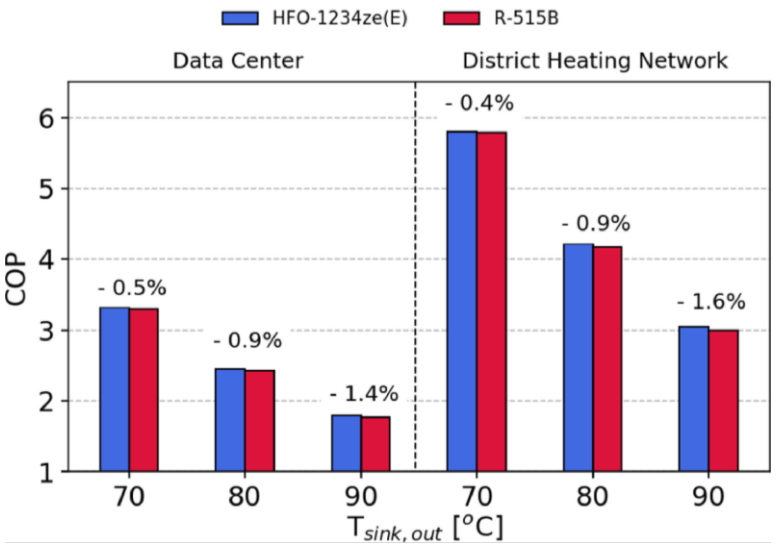
Selon la température du dissipateur thermique et de la source de chaleur, le COP variera considérablement.

La COP représente le kW de chauffage ou de refroidissement par kW d'électricité absorbée.

Un COP plus élevé représente une consommation d'énergie plus faible, des coûts d'exploitation plus faibles et des émissions de CO2 moindres. (un potentiel de décarbonation plus élevé)







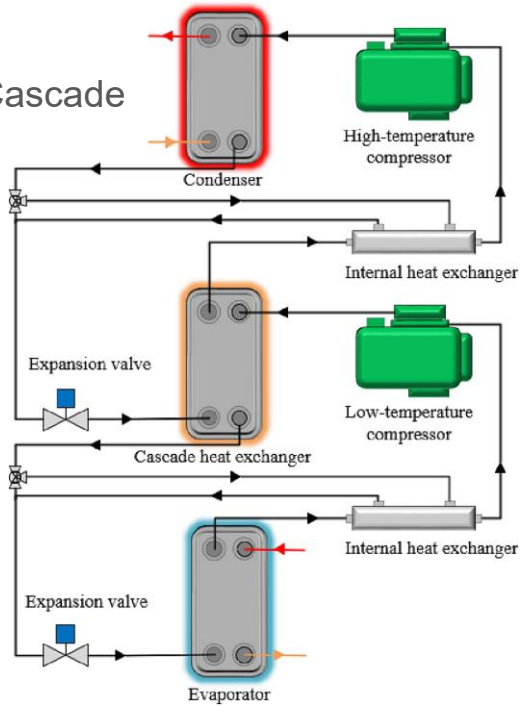
Carlos Mateu-Royo, Adrián Mota-Babiloni, Joaquín Navarro-Esbrí, Ángel Barragán-Cervera, Comparative analysis of HFO-1234ze(E) and R-515B as low GWP alternatives to HFC-134a in moderately high temperature heat pumps, International Journal of Refrigeration, Volume 124, 2021, Pages 197-206, ISSN 0140-7007, https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.12.023.

1.5. INTÉGRATION

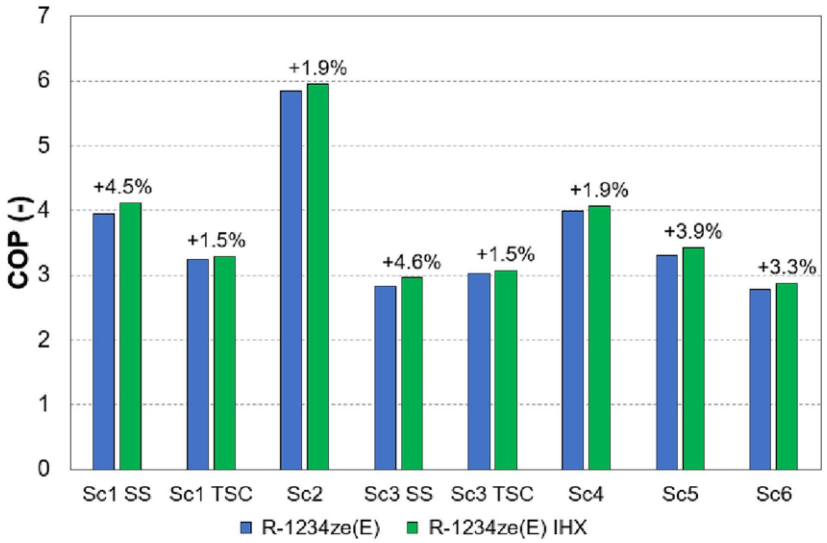
Combinaison avec DHN, DCN et procédés industriels : perspective énergétique

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

Two-Stage Cascade



Scenarios	T_o (°C)	T_k (°C)	Configuration of cycle	Process	Configuration of the connection
Scenario 1	30	80	SS/TSC	Industrial (cooling dissipation water) and heat supply (conventional boiler substitute) supply heat to 4G District Heating Network (DHN).	C_HP_DHN
Scenario 2	30	65	SS	Cooling dissipation water (heat recovery) and supply heat to 4G District Heating Network (DHN).	C_HP_DHN
Scenario 3	2	65	SS/TSC	Simultaneous production of DHN heating (70–40 °C) and DCN cooling (17–7 °C) 4G.	C_HP_DHC
Scenario 4	2	45	SS	Simultaneous production of DHN heating (47–40 °C) and DCN cooling (17–7 °C) 4G.	C_HP_DHC
Scenario 5	50	90	SS	Heat production (conventional boiler substitute) sourced from DHN (70–40 °C) 4G.	L_HP_DHN
Scenario 6	10	90	TSC	Heat production (conventional boiler substitute) sourced from DHN (<40 °C) 5G.	L_HP_DHN

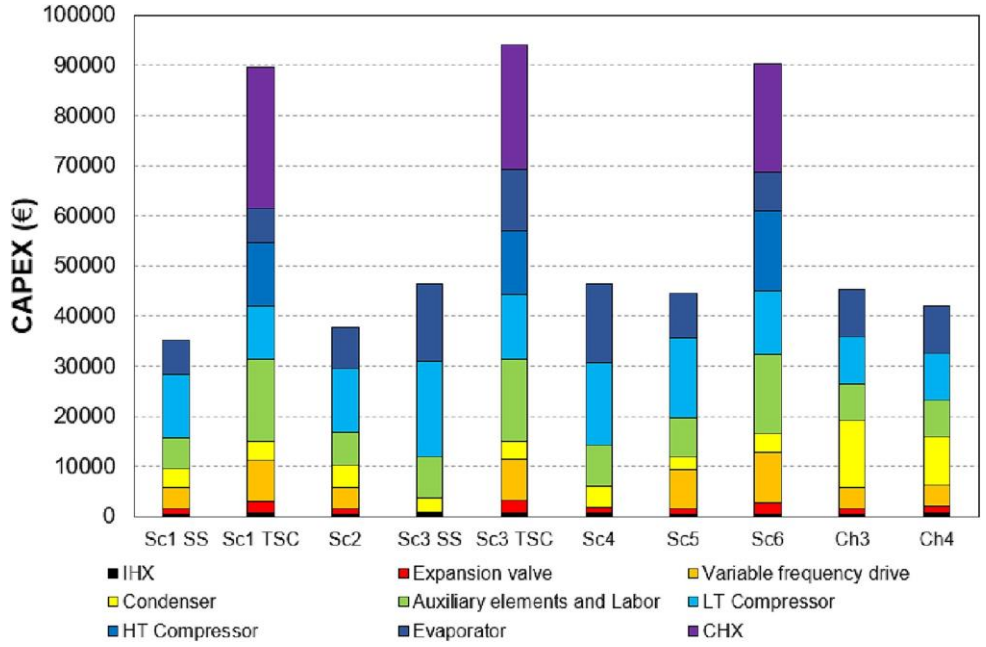


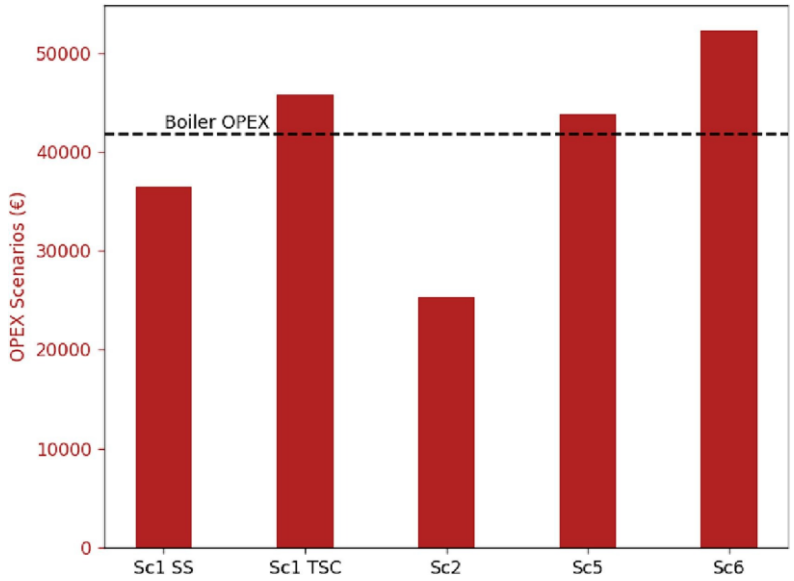
Ghad Alarnaot Alarnaout, Joaquín Navarro-Esbrí, Adrián Mota-Babiloni, Operational, economic, and carbon footprint feasibility of a moderately-high-temperature heat pump as an alternative to conventional boilers in various scenarios, Energy Conversion and Management, Volume 309, 2024, 118424, ISSN 0196-8904, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118424.

1.5. INTÉGRATION

Combinaison avec DHN, DCN et processus industriels : perspective économique

Les coûts d'exploitation et d'investissement dépendent fortement des applications envisagées, tandis qu'une chaudière à combustible fossile 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.



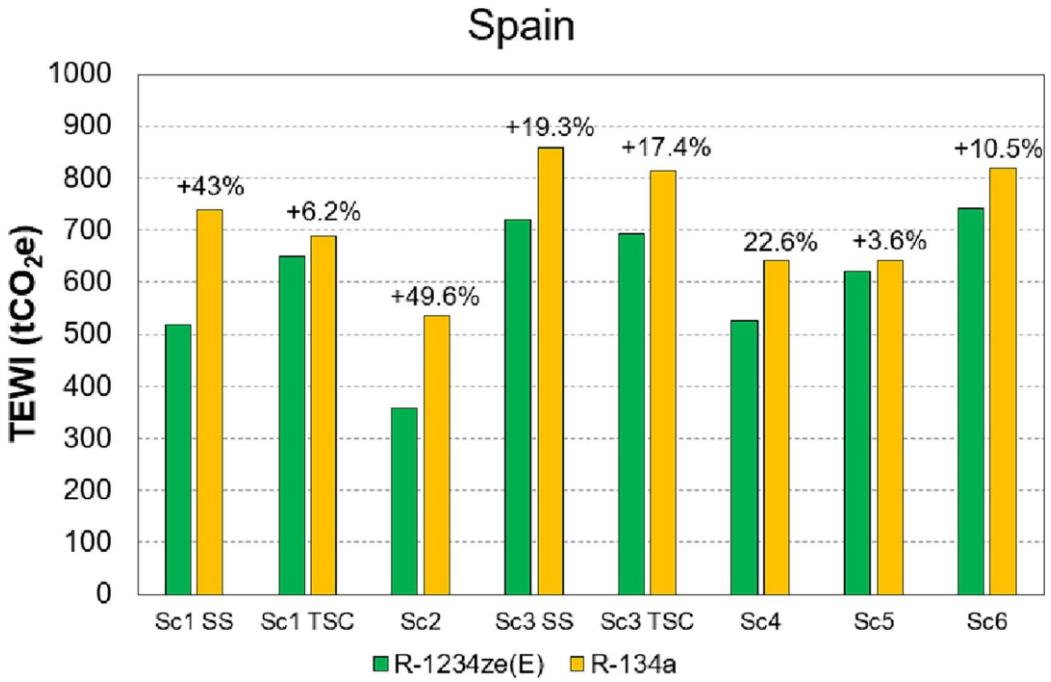


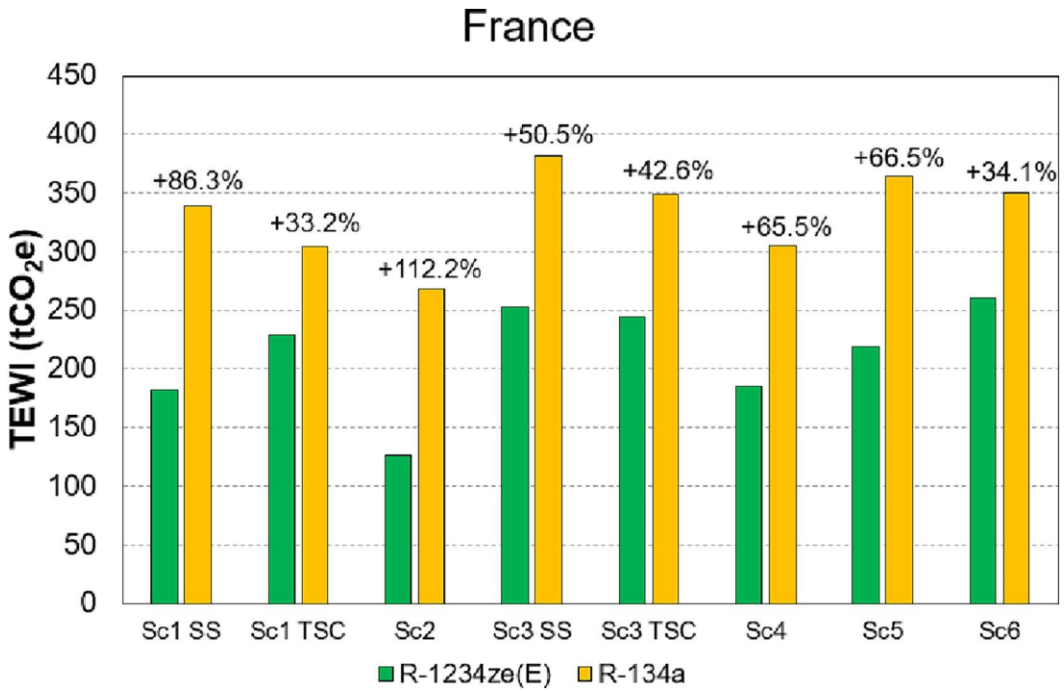
Ghad Alarnaot Alarnaout, Joaquín Navarro-Esbrí, Adrián Mota-Babiloni, Operational, economic, and carbon footprint feasibility of a moderately-high-temperature heat pump as an alternative to conventional boilers in various scenarios, Energy Conversion and Management, Volume 309, 2024, 118424, ISSN 0196-8904, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118424.

1.5. INTÉGRATION

Combinaison avec DHN, DCN et procédés industriels : perspective environnementale

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



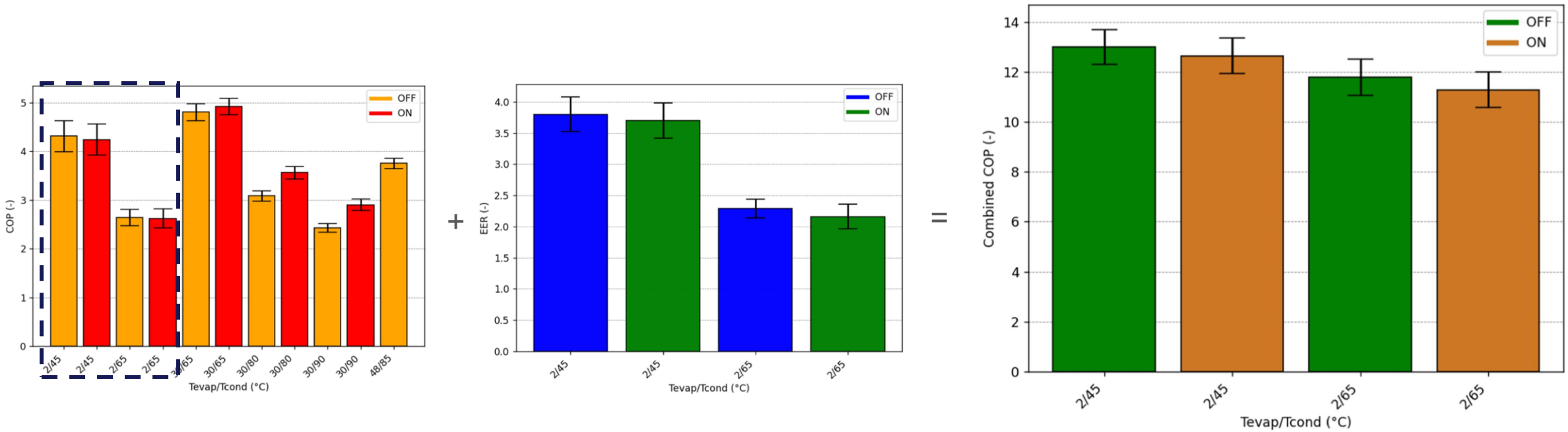


Ghad Alarnaot Alarnaout, Joaquín Navarro-Esbrí, Adrián Mota-Babiloni, Operational, economic, and carbon footprint feasibility of a moderately-high-temperature heat pump as an alternative to conventional boilers in various scenarios, Energy Conversion and Management, Volume 309, 2024, 118424, ISSN 0196-8904, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118424.

1.5. INTÉGRATION

COP combiné

Le COP combiné ou agrégé considère que la sortie de transfert de chaleur de la pompe à chaleur est le refroidissement et le chauffage (quantifiés respectivement par l'EER et le COP). En même temps, l'électricité est l'entrée lorsqu'elle est dissipée de l'ambiant.

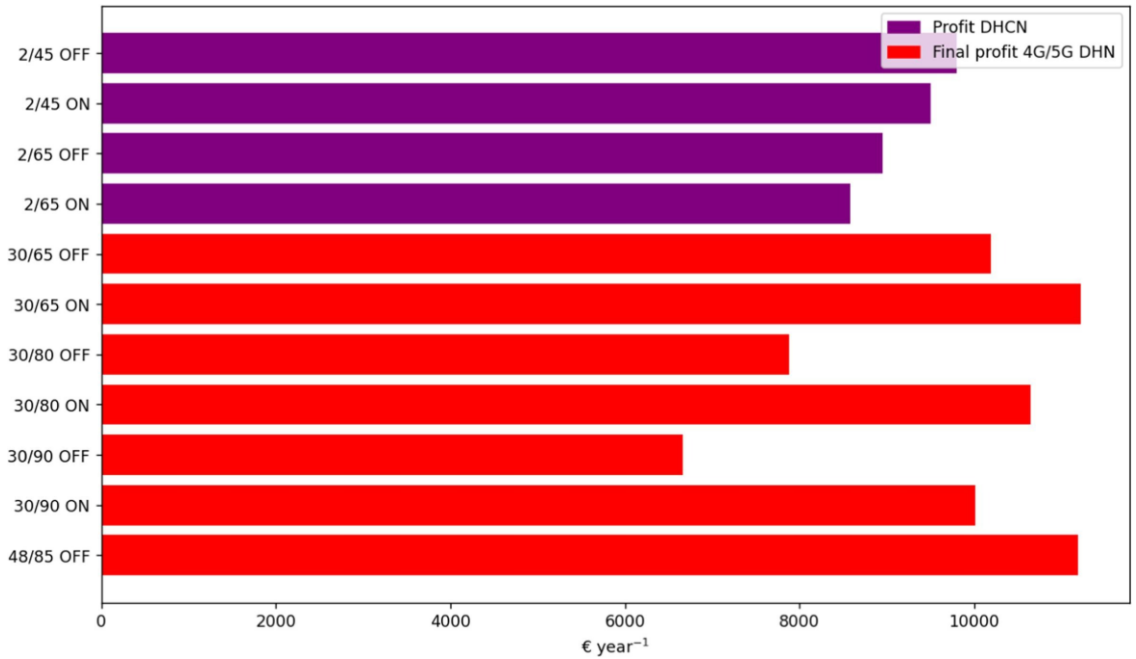


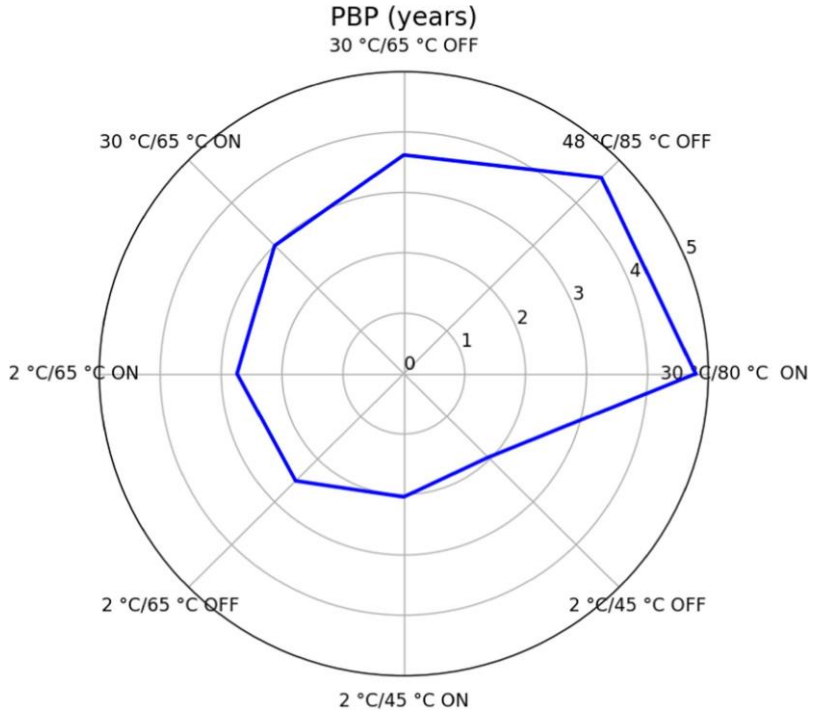
Ghad Alarnaot-Alarnaout, Joaquín Navarro-Esbrí, Ángel Barragán-Cervera, Adrián Mota-Babiloni, Energy, exergy, economic, and environmental (4E) assessment of an experimental moderately high-temperature heat pump for district heating and cooling networks, Energy Conversion and Management, Volume 325, 2025, 119346, ISSN 0196-8904, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119346.

1.5. INTÉGRATION

Comparaison avec une chaudière à combustibles fossiles

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

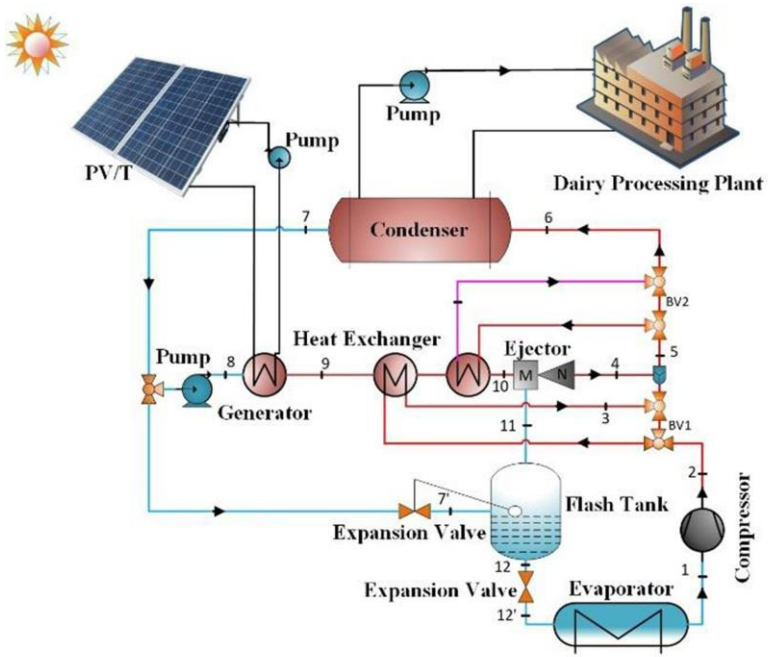




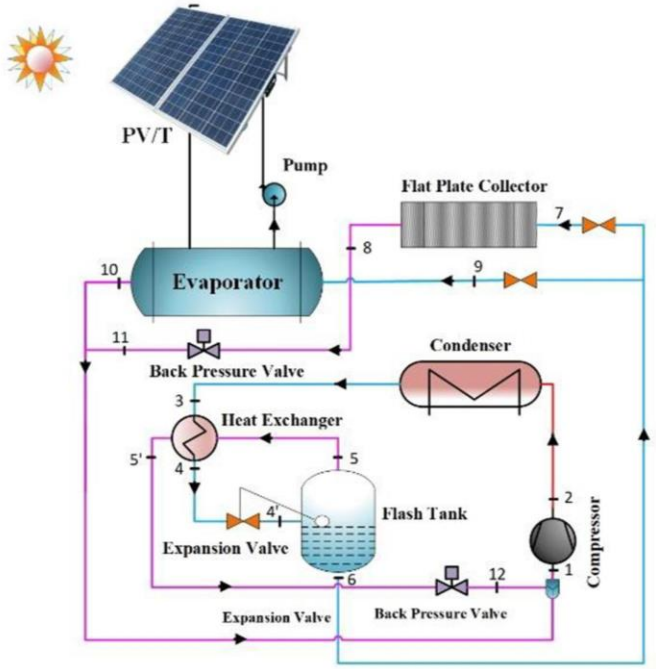
Ghad Alarnaot-Alarnaout, Joaquín Navarro-Esbrí, Ángel Barragán-Cervera, Adrián Mota-Babiloni, Energy, exergy, economic, and environmental (4E) assessment of an experimental moderately high-temperature heat pump for district heating and cooling networks, Energy Conversion and Management, Volume 325, 2025, 119346, ISSN 0196-8904, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119346.

1.6. CHALEUR RENOUVELABLE et de RECUPERATION

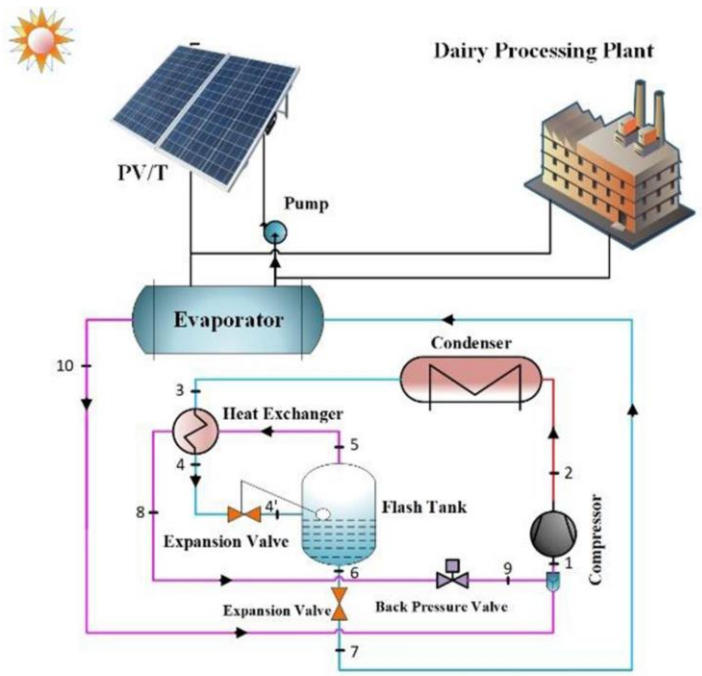
Exemple 1. Une nouvelle pompe à chaleur solaire à éjection solaire à chauffe perdue et à éjection solaire innovante, destinée à des usages simultanés de chauffage et de climatisation**.**



Mode refroidissement



Mode chauffage avec chaleur fatale PV/T



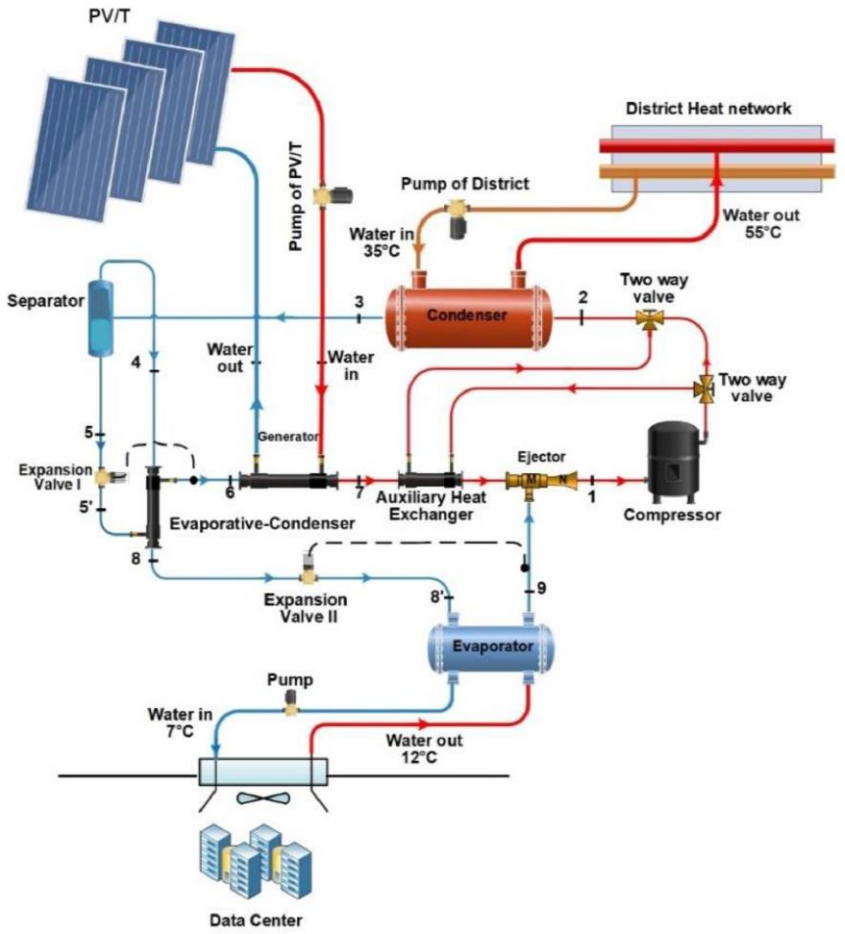
Mode chauffage avec récupération de la chaleur résiduelle du lait

Ali Khalid Shaker Al-Sayyab, Adrián Mota-Babiloni, Joaquín Navarro-Esbrí, Novel compound waste heat-solar driven ejector-compression heat pump for simultaneous cooling and heating using environmentally friendly refrigerants, Energy Conversion and Management, Volume 228, 2021, 113703, ISSN 0196-8904, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113703.

1.6. CHALEUR RENOUVELABLE et de RECUPERATION

Example 2

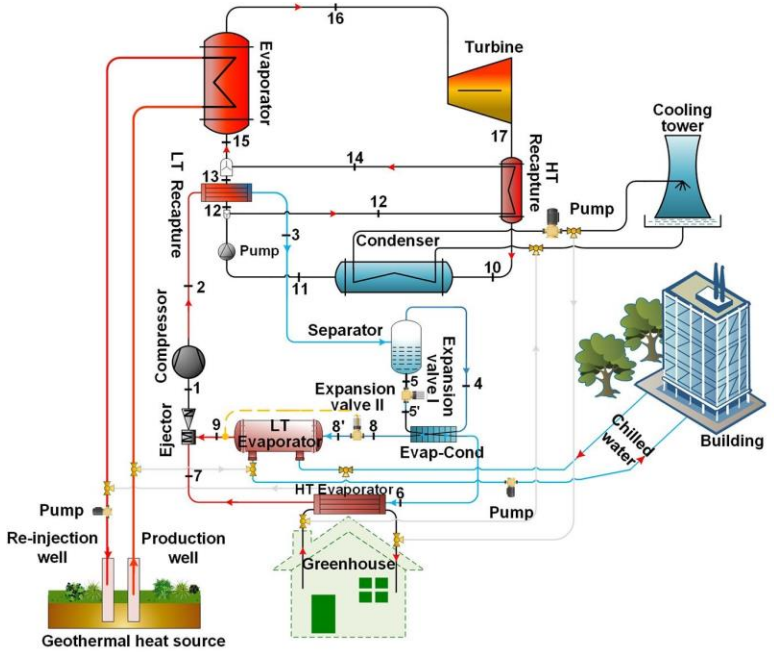
A novel compound PV/T (photovoltaic thermal) waste heat driven ejector-heat pump system for simultaneous data center cooling and waste heat recovery for district heating networks.



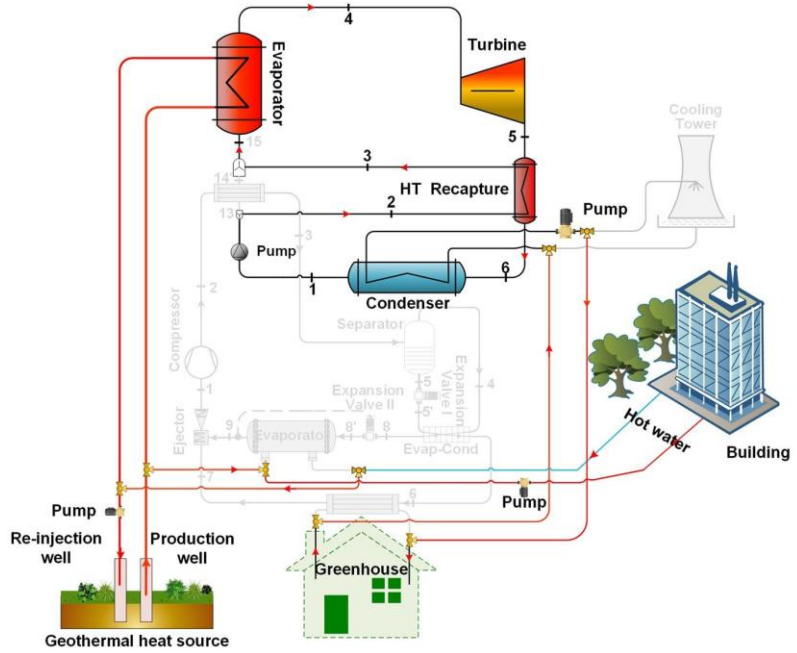
Ali Khalid Shaker Al-Sayyab, Joaquín Navarro-Esbrí, Adrián Mota-Babiloni, Energy, exergy, and environmental (3E) analysis of a compound ejector-heat pump with low GWP refrigerants for simultaneous data center cooling and district heating, International Journal of Refrigeration, Volume 133, 2022, Pages 61-72, ISSN 0140-7007, https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.09.036.

1.6. CHALEUR RENOUVELABLE et de RECUPERATION

Example 3. Combined organic Rankine and compound ejector-multi evaporator vapour compression system for two cooling levels and heating purposes with power generation, geothermal and condenser waste heat utilisation.



Combined power-cooling

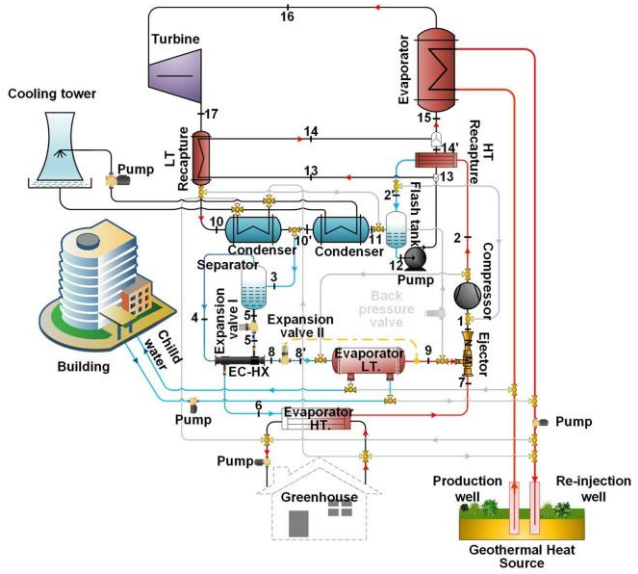


Combined power-heating

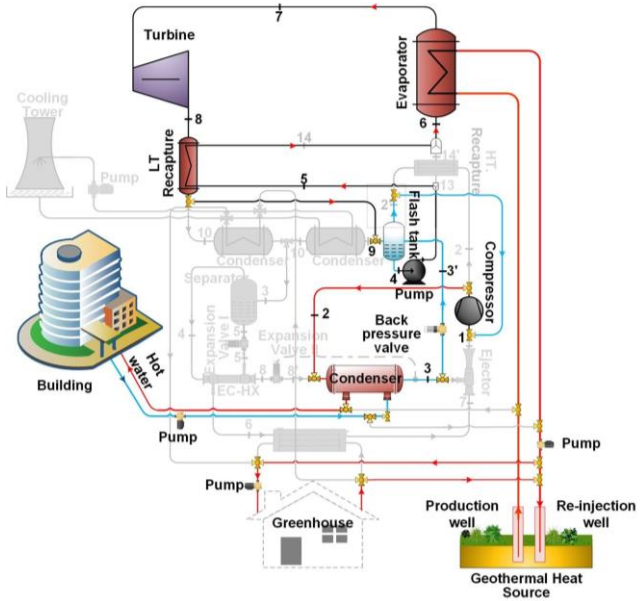
Ali Khalid Shaker Al-Sayyab, Adrián Mota-Babiloni, Ángel Barragán-Cervera, Joaquín Navarro-Esbrí, Dual fluid trigeneration combined organic Rankine-compound ejector-multi evaporator vapour compression system, Energy Conversion and Management, Volume 267, 2022, 115876, ISSN 0196-8904, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115876.

1.6. CHALEUR RENOUVELABLE et de RECUPERATION

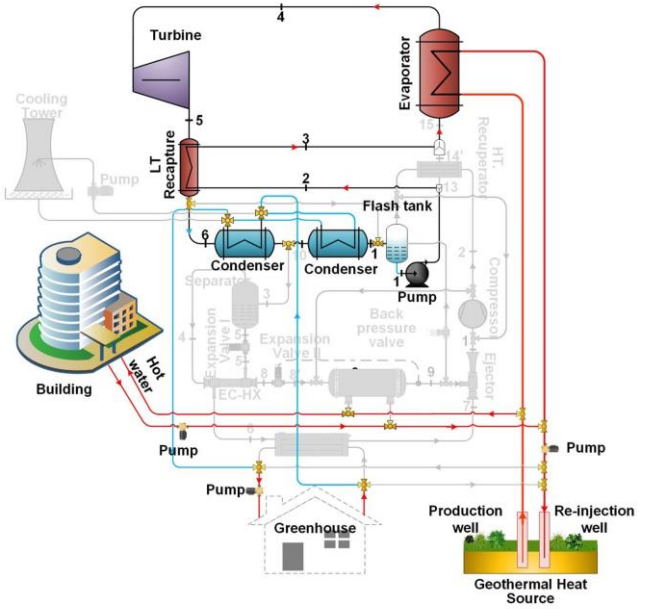
Exemple 4. Un ORC combiné à un VCC(Machine à Compression de Vapeur) à éjecteur thermique à effet de serre composé pour un refroidissement et un chauffage efficaces.



Refroidissement



Chauffage par pompe à chaleur



Chauffage par la source géothermique

Ali Khalid Shaker Al-Sayyab, Adrián Mota-Babiloni, Ángel Barragán-Cervera, Joaquín Navarro-Esbrí, Dual fluid trigeneration combined organic Rankine-compound ejector-multi evaporator vapour compression system, Energy Conversion and Management, Volume 267, 2022, 115876, ISSN 0196-8904, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115876.

Source: Al-Sayyab et al. (2023)

1.7. CONCLUSIONS

- Le chauffage et la climatisation simultanés sont possibles avec des pompes à chaleur/refroidisseurs
- Cela permet de maximiser la production d'énergie de la pompe à chaleur. Sinon, ce serait gaspillé.
- Le DHN et le DCN sont idéalement adaptés pour maximiser le profit et réduire le besoin de stratégies coûteuses de décalage des pics ou de stockage thermique plus important.
- 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.
- Le chauffage et la climatisation simultanés contribuent à de meilleures conditions de fonctionnement pour la pompe à chaleur.
- L'efficacité énergétique est essentielle pour rendre les pompes à chaleur compétitives face aux chaudières.
- Les pompes à chaleur sont particulièrement efficaces lorsque leurs composants utilisent de la chaleur renouvelable ou résiduelle. Une grande variété de sources de chaleur peut être envisagée.

2. TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID



SHaKE

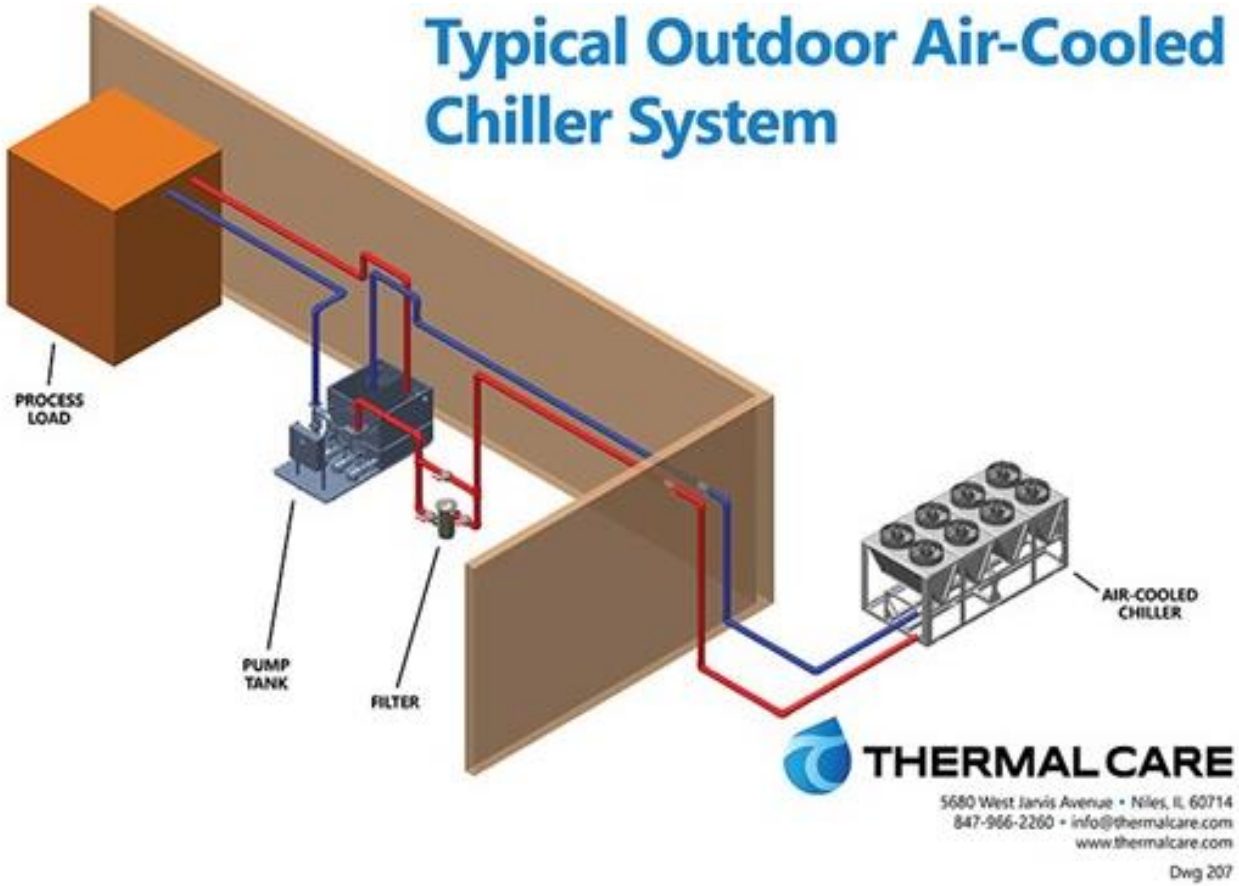
2.1. REFROIDISSEURS A EAU GLACEE

Introduction

Un refroidisseur **prélève de 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, de plusieurs 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.

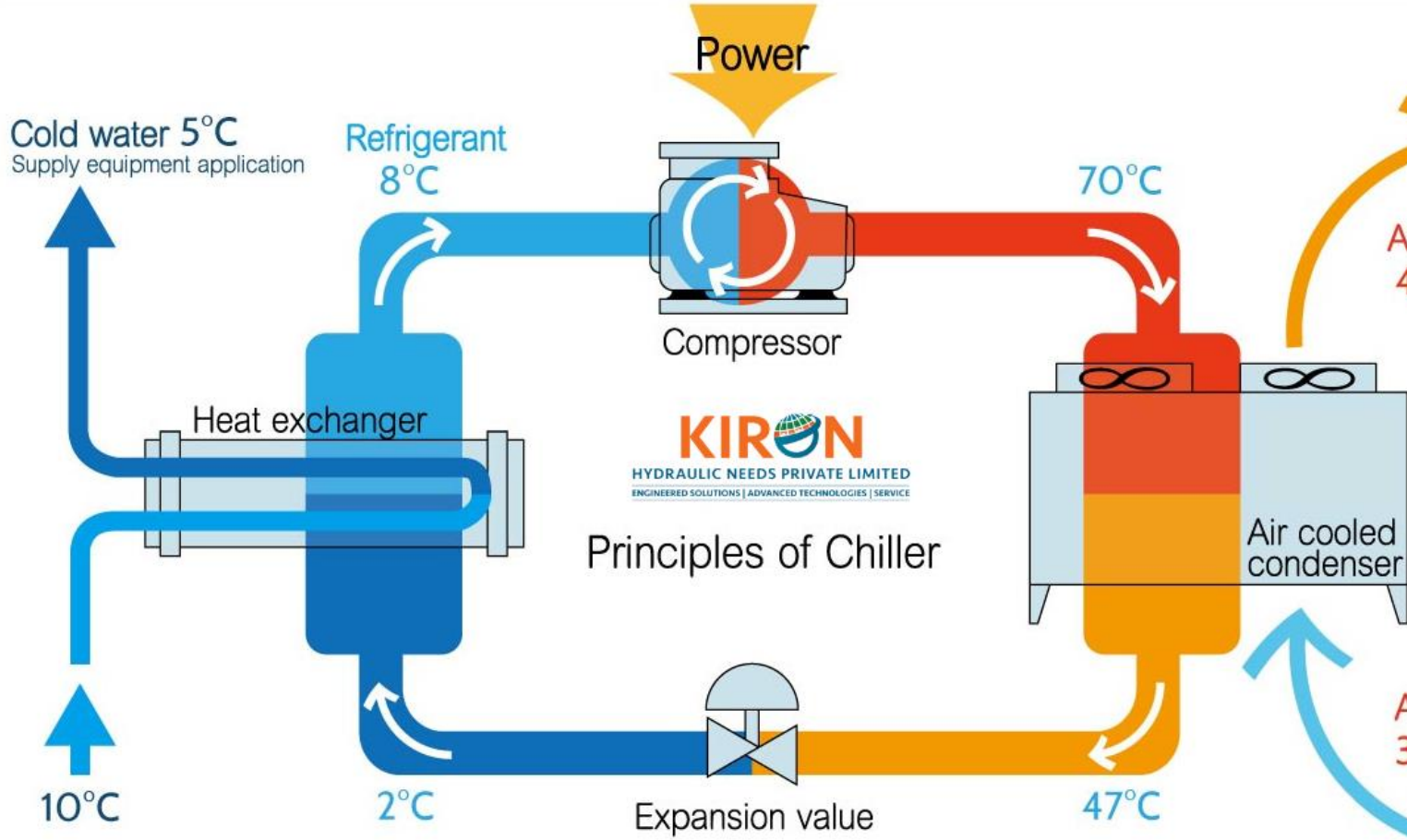


Plastics Technology. (n.d.). How does a chiller work. https://www.ptonline.com/kc/process-cooling/basics/how-does-a-chiller-work

2.1. REFROIDISSEURS A EAU GLACEE

Opération

- Le cycle du refroidisseur fonctionne comme le cycle pompe à chaleur mais se concentre uniquement sur le refroidissement
- À l'évaporateur, la chaleur est absorbée en échangeant la chaleur avec de l'eau liquide
- La chaleur est rejetée en l'échangeant avec de l'air (généralement au toit)
- L'unité qui contient les ventilateurs pour rejeter la chaleur est appelée unité de condensation



Kiron Hydraulic Needs. (2023, July 31). Chiller circulation system. Group Kiron. https://www.groupkiron.com/blog/chiller-circulation-system/

2.1. REFROIDISSEURS A EAU GLACEE

Types de refroidisseurs

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

Refroidisseurs à air :

Utilisez des ventilateurs pour souffler de l'air sur une bobine de condenseur afin de libérer de la chaleur.

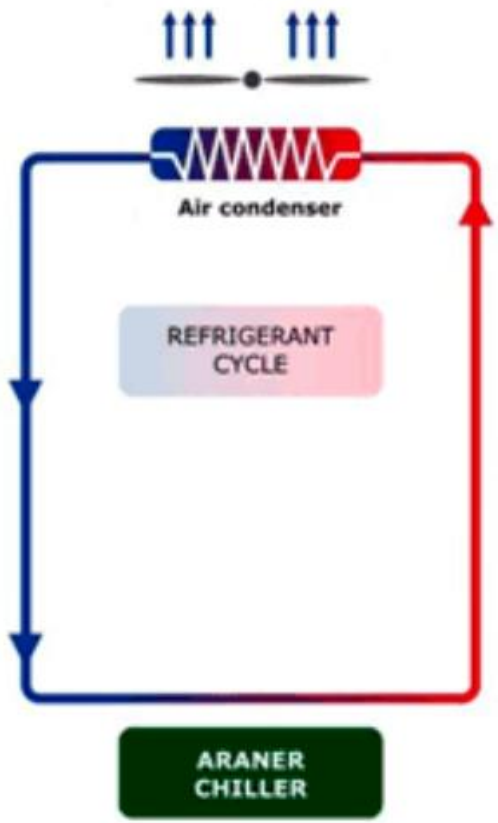
Idéal pour les systèmes de petite à moyenne taille ou où l'accès à l'eau est limité.

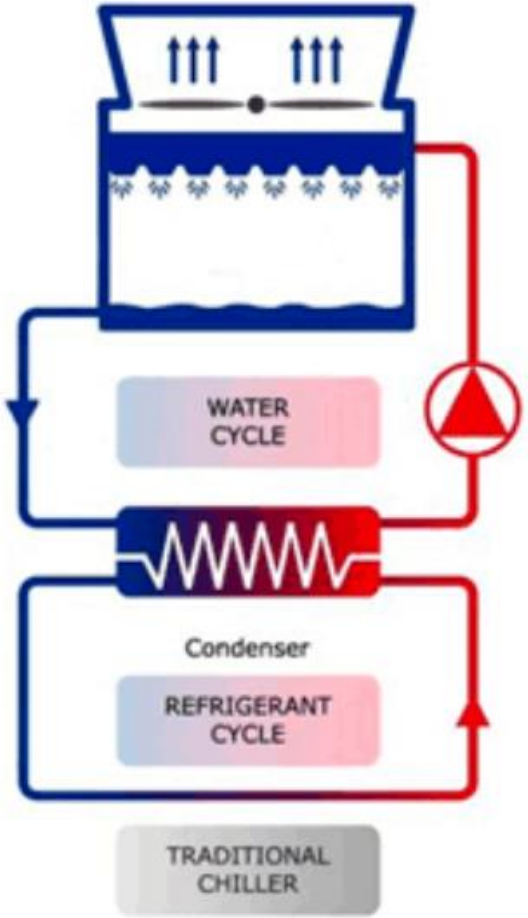
C'est courant dans les systèmes CVC commerciaux.

Refroidisseurs à eau (centrifuges) :

Utilisez des tours de refroidissement humides pour dissiper la chaleur plus efficacement.

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



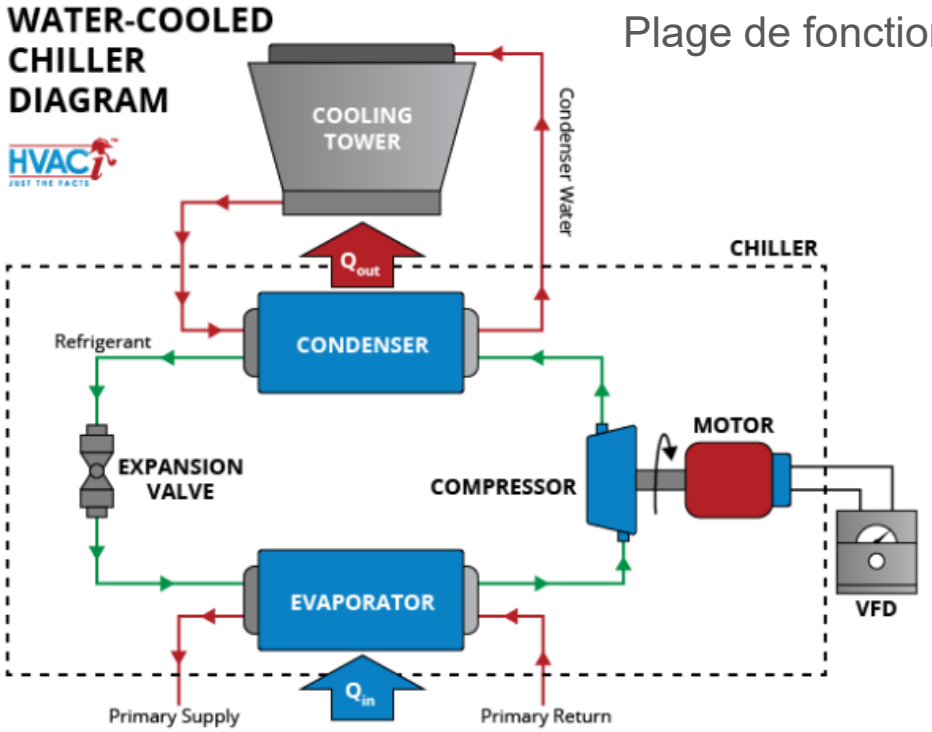


Araner. (n.d.). Air-cooled vs. water-cooled chiller. https://www.araner.com/blog/air-cooled-vs-water-cooled-chiller

2.1. REFROIDISSEURS A EAU GLACEE

Groupe de production d'eau glacée refroidi par eau

Le groupe de production d'eau glacée refroidi par eau rejette la chaleur en utilisant de l'eau au lieu de l'air, puis l'eau est refroidie dans la tour de refroidissement et réintroduite dans le condenseur.



Plage de fonctionnement : 50 kW à 10 000 kW



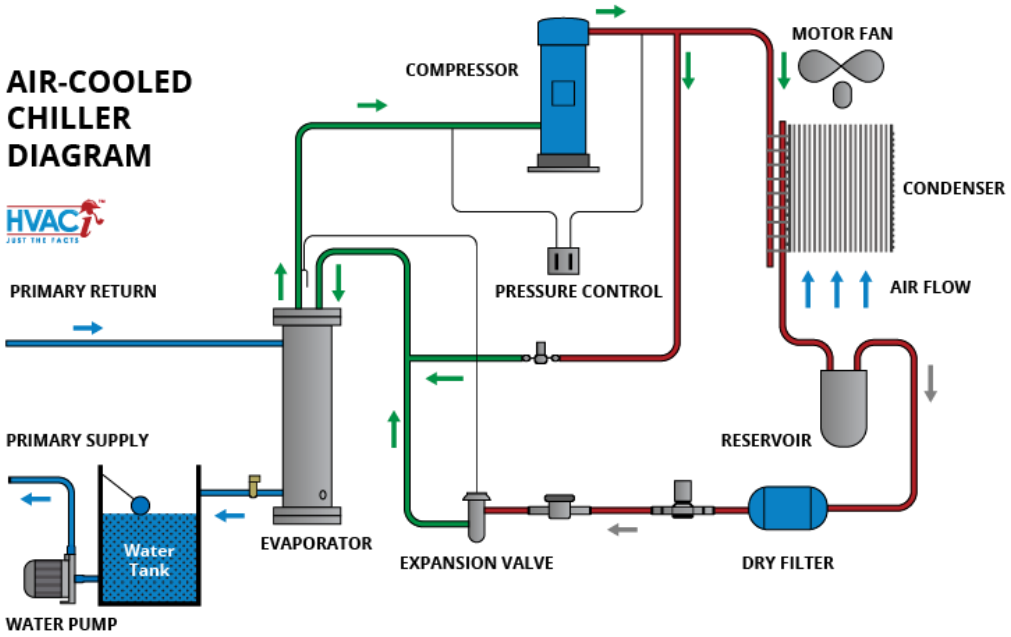
Alpine Intel. (2025). The basics of chillers. https://alpineintel.com/resource/the-basics-of-chillers/

Carrier CCA. (n.d.). Product listing (Parent ID: 7, Category ID: 48). https://www.carriercca.com/product_listing.cfm?parent_id=7&cat_id=48

2.1. REFROIDISSEURS A EAU GLACEE

Groupe de production d'eau glacée refroidi par air

Le groupe de production d'eau glacée refroidi par air est le refroidisseur de base, le réfrigérant est directement refroidi avec de l'air, ce qui signifie que la chaleur est rejetée directement vers l'ambiant.



Range: 15 kW to 1500 kW



Alpine Intel. (2025). The basics of chillers. https://alpineintel.com/resource/the-basics-of-chillers/

Carrier CCA. (n.d.). Product listing (Parent ID: 7, Category ID: 48). https://www.carriercca.com/product_listing.cfm?parent_id=7&cat_id=48

2.1. REFROIDISSEURS A EAU GLACEE

Indicateurs clés et efficacité

Capacité de refroidissement (Qo) : Mesurée en tonnes de réfrigération ou en kilowatts (kW), indiquant la quantité de chaleur prélevée.

Consommation d'énergie (Wc) : Les compresseurs sont les composants qui consomment le plus d'électricité du système (kW), 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.

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).

$$EER = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{W}_c}$$

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

2.1. REFROIDISSEURS A EAU GLACEE

Ratio d'efficacité énergétique saisonnière (SEER)

SEER utilise une température intérieure fixe, ainsi que différentes températures extérieures et capacités de charge pour simuler la vie réelle.

La norme EN 14825 définit la méthodologie du test.

		Capacity			
		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

La classe d'efficacité énergétique dépend du SEER et du type d'équipement. Entre A+++ et G, A+++ étant la classe la plus efficace.

2.1. REFROIDISSEURS A EAU GLACEE

Performance du système

Cela dépend de :

Le design et l'installation professionnelle de l'ensemble du système.

L'entretien régulier.

La taille du bâtiment à climatiser et son efficacité énergétique.

La taille du système et sa capacité de traitement de l'air.

La durée d'utilisation quotidienne du système.

La température intérieure.

La température de l'air extérieur.

AC	CHF	
≥ 5.05	≥ 5.1	A
4.65≤EER<5.05	4.9≤EER<5.1	B
4.25≤EER<4.65	4.7≤EER<4.9	C
3.85≤EER<4.25	4.5≤EER<4.7	D
3.45≤EER<3.85	4.3≤EER<4.5	E
3.05≤EER<3.45	4.1≤EER<4.3	F
< 3.05	<4.1	G



Eurovent Certita Certification. (n.d.). Eurovent Certified Performance. https://www.eurovent-certification.com/en/

2.1. REFROIDISSEURS A EAU GLACEE

Applications des refroidisseurs

Systèmes CVC

Processus industriels (transformation alimentaire, transformation plastique, finition métallique...)

Centres de données

Réfrigération

Soins de santé

Centrales électriques

Patinoires

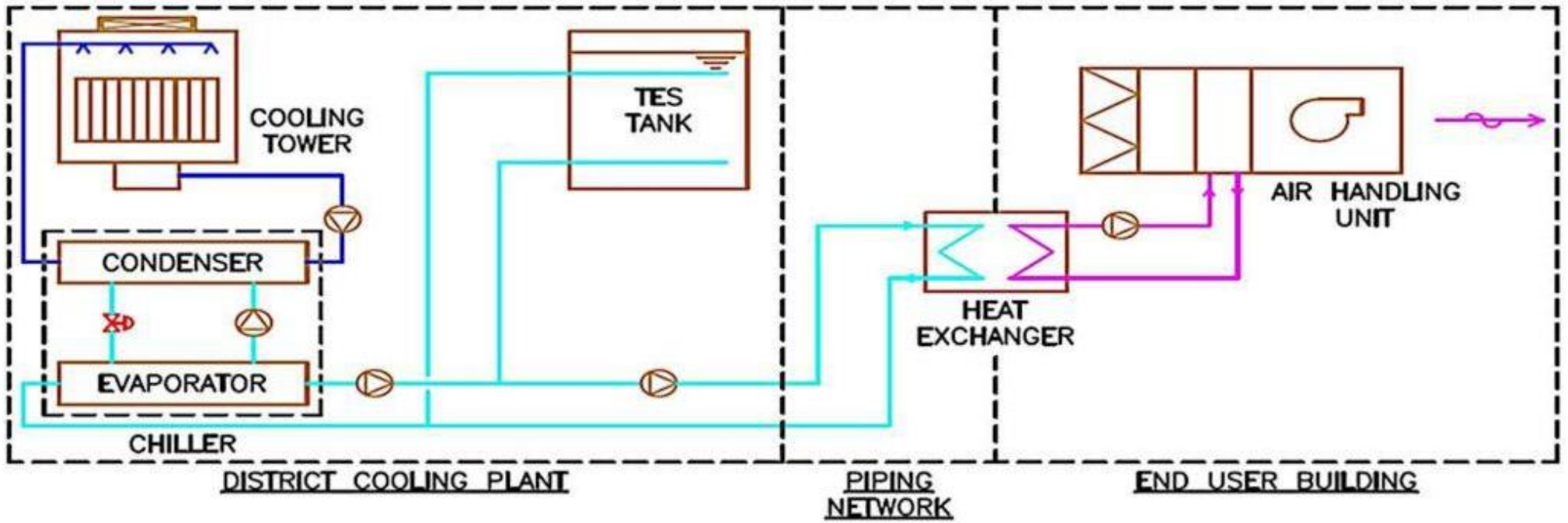
Refroidissement urbain



Cold Shot Chillers. (n.d.). Air-cooled chillers. https://waterchillers.com/air-cooled-chillers/

2.1. REFROIDISSEURS A EAU GLACEE

Intégration des refroidisseurs dans DCN



Il y a deux considérations principales lors de l'intégration d'un refroidisseur au DCN : premièrement, le type de refroidisseur utilisé est généralement refroidi par eau, car le DCN nécessite un refroidisseur à haute capacité, la gestion des débits élevés nécessite un refroidissement par eau. De plus, le stockage d'énergie thermique est toujours nécessaire pour répondre à la demande requise du district à différentes époques.

District Cooling Pro. (n.d.). What are the main components of a district cooling system? https://districtcooling.pro/what-are-the-main-components-of-a-district-cooling-system/

2.2. MACHINES DE RÉFRIGÉRATION À ABSORPTION

Réfrigération par absorption

Principaux éléments :

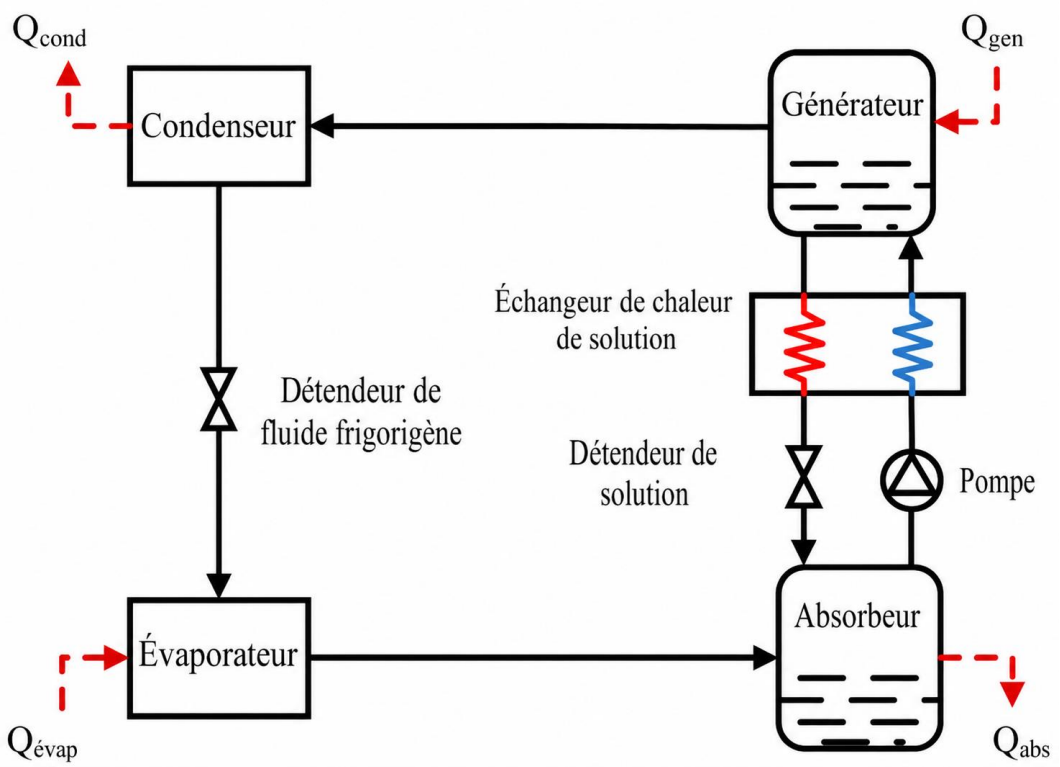
Évaporateur : Où le réfrigérant absorbe la chaleur et s'évapore.

Absorbeur : Lorsque la vapeur de réfrigérant est absorbée par le fluide absorbant.

Générateur : Lorsque le réfrigérant est séparé de l'absorbant par la chaleur, régénérant ainsi le réfrigérant.

Condenseur : Où le réfrigérant libère de la chaleur et se condense à nouveau en liquide.

.



Wang, L., He, L., & He, Y. (2024). Review on Absorption Refrigeration Technology and Its Potential in Energy-Saving and Carbon Emission Reduction in Natural Gas and Hydrogen Liquefaction. Energies, 17(14), 3427. https://doi.org/10.3390/en17143427

2.2. MACHINES DE RÉFRIGÉRATION À ABSORPTION

Types de systèmes de réfrigération à absorption

Deux paires principales réfrigérant/absorbant sont utilisées selon la plage de température :

Ammoniac–Eau (NH_3–H_2O) – pour les applications en dessous de 50 °C
L'ammoniac agit comme réfrigérant, l'eau comme absorbant. Courant dans le refroidissement industriel.

Avantages : Hautes performances dans les applications à basse température

Inconvénients : L'eau est volatile, nécessitant un redresseur ; Le système est complexe. L'ammoniac est inflammable, toxique et incompatible avec le cuivre/laiton, donc les systèmes sont construits en acier.

Eau–Bromure de lithium (H_2O–LiBr) – pour les applications au-dessus de 50 °C
L'eau est le réfrigérant, le LiBr l'absorbant. Largement utilisé dans la climatisation et l'eau chaude pour les grands bâtiments.

Avantages : Sécurité élevée, stabilité, forte affinité et chaleur latente ; charge réglable via reconcentration absorbante

2.2. MACHINES DE RÉFRIGÉRATION À ABSORPTION

Paramètres pertinents

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**.**

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 résiduelle ou l'énergie solaire. Il est souvent mesuré en kW.

Coefficient de performance (COP) : Le rapport de capacité de refroidissement (Qo) à la chaleur apportée (Qg).

$$COP = \frac{\dot{Q}_O}{\dot{Q}_g}$$

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.

2.2. MACHINES DE RÉFRIGÉRATION À ABSORPTION

Comparé aux systèmes de compression vapeur :

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

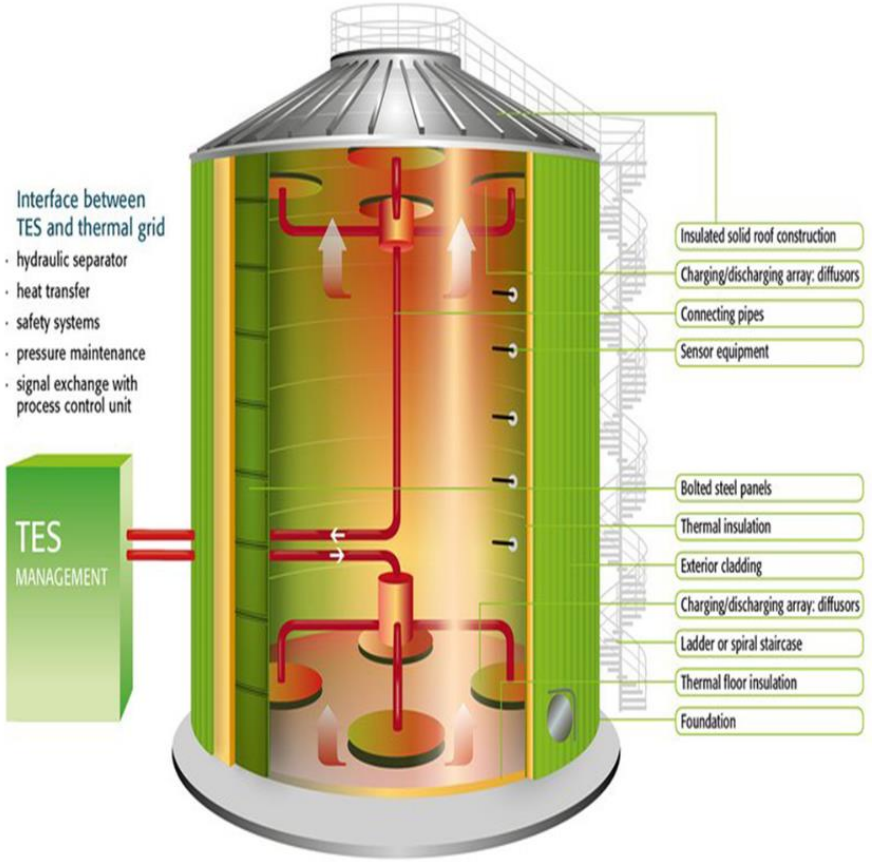
2.3. STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE (TES)

Introduction à 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 à celui des batteries électriques, mais au lieu de stocker de 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 résiduelle, est disponible, puis consommée lorsque nécessaire. Cela est particulièrement intéressant dans les DCN, où le refroidissement central ou le refroidissement des déchets est indépendant des consommateurs individuels ou industriels.



API Energy. (n.d.). API Energy thermal energy storage (TES) water / ice. http://apienergy.co.uk/product/api-energy-thermal-energy-storage-tes-water-ice/

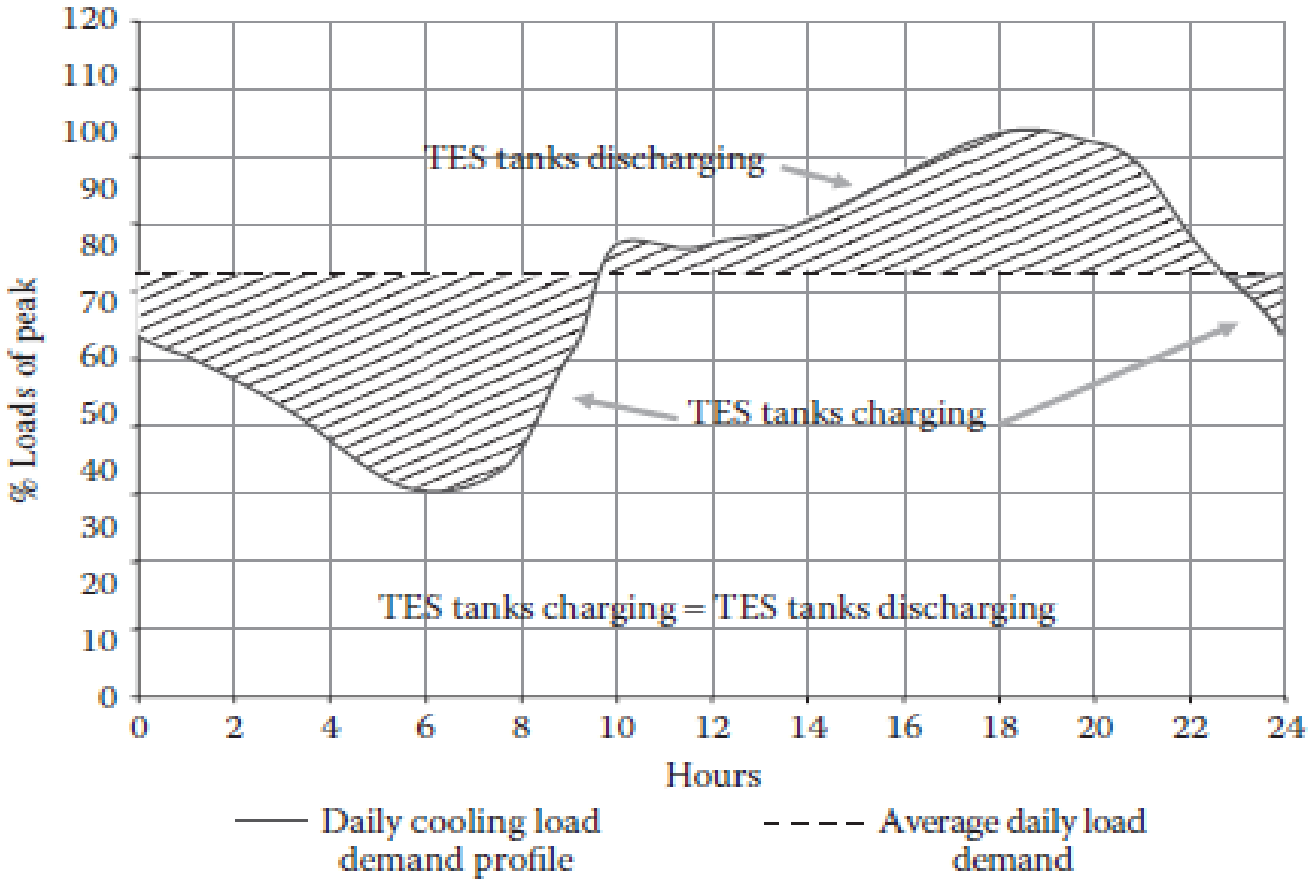
2.3. STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE (TES)

Principal avantage de TES

Dans les DCN, le TES consiste généralement à stocker de l'énergie froide dans un réservoir d'eau isolé. Le réservoir est refroidi ou gelé pendant les périodes creuses (nuit ou week-end) et fondu ou réchauffé pendant les heures de pointe (en semaine).

Cela réduit le besoin de grands refroidisseurs pendant les pics de demande en déchargeant le TES pour couvrir une partie ou la totalité de la charge. La capacité supplémentaire du refroidisseur charge le 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.



Ghajar, A. J., Kraus, A. D., Welty, J. R., & Aziz, A. (2017). HEAT TRANSFER A Series of Reference Books and Textbooks Series editor Introduction to Thermal and Fluid Engineering. www.ebook3000.com

2.3. STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE (TES)

Type de TES

	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	1ºC to 7ºC	4ºC to 6ºC	-1ºC to 2ºC
Température de recharge	-8ºC to -2ºC	4ºC to 6ºC	-1ºC to 2ºC
Installation de refroidissement de recharge et alimentation électrique (kW d'électricité en entrée/kW thermique sortie)	0.8 to 1.1 kW/ton (0.23 to 0.31)	0.6 to 0.7 kW/ton (0.23 to 0.31)	0.7 to 0.8 kW/ton (0.23 to 0.31)

District cooling guide. (2013). ASHRAE. https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/district-heating-and-cooling-guides

2.3. STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE (TES)

Applications

Établissements éducatifs : écoles, collèges et universités

Établissements de santé : hôpitaux, cliniques, laboratoires et recherche médicale

Aéroports, musées : complexes sportifs et de divertissement

Installations gouvernementales : institutionnelles ; militaire ; la recherche ; administratif ; et établissements correctionnels, au niveau fédéral, étatique et local

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

Réseaux de froid : systèmes de services publics CHW vendant la climatisation à plusieurs clients

Services énergétiques/Contrats de performance : projets financés par des tiers, financés par des économies liées à l'efficacité énergétique

Refroidissement des turbines : augmentation de la puissance et de l'efficacité des centrales à turbines à combustion en temps chaud

2.3. STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE (TES)

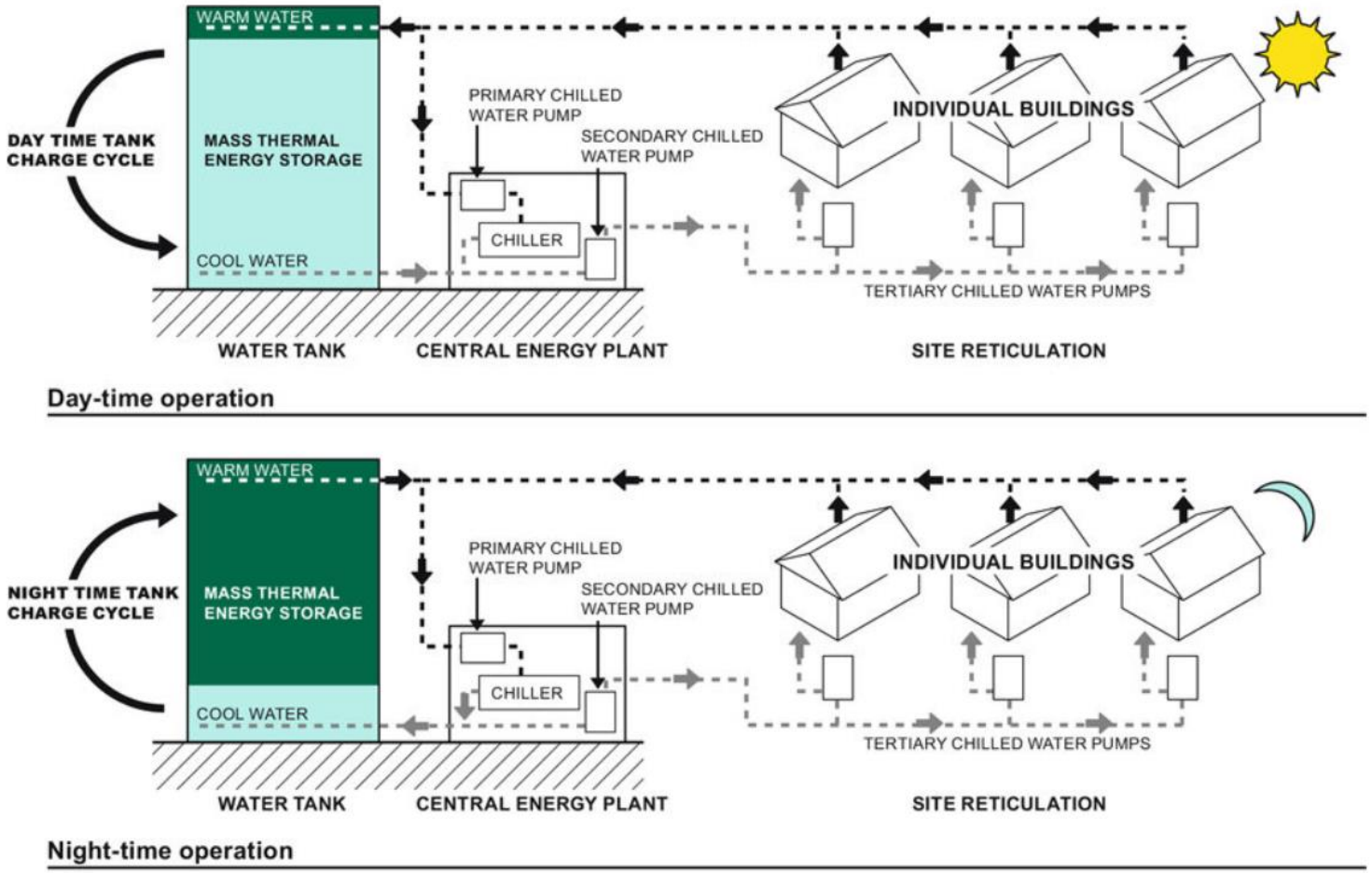
Intégration de TES dans le DCN

TES : conserve au froid pour une utilisation ultérieure

DCN : équilibre l'offre et la demande

Avantages : réduction de la charge maximale et amélioration de la flexibilité du système

Impact : augmente l'efficacité globale et permet une meilleure utilisation de la chaleur renouvelable et de la chaleur résiduelle



Thirkell Consulting Engineers. (n.d.). District cooling system with large scale thermal energy water storage. https://www.thirkell.com.au/tropicalbuild/case-studies/district-cooling-system-with-large-scale-thermal-energy-water-storage

2.3. STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE (TES)

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

Le **coût global de l'installation** est plus bas en raison de la réduction de la capacité installée de l'usine 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.

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.

L'impact environnemental est réduit grâce à la diminution 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.

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'installation sera inférieure en raison de l'énergie déjà accumulée dans le réservoir. Par conséquent, un système de réfrigération plus petit peut être utilisé.

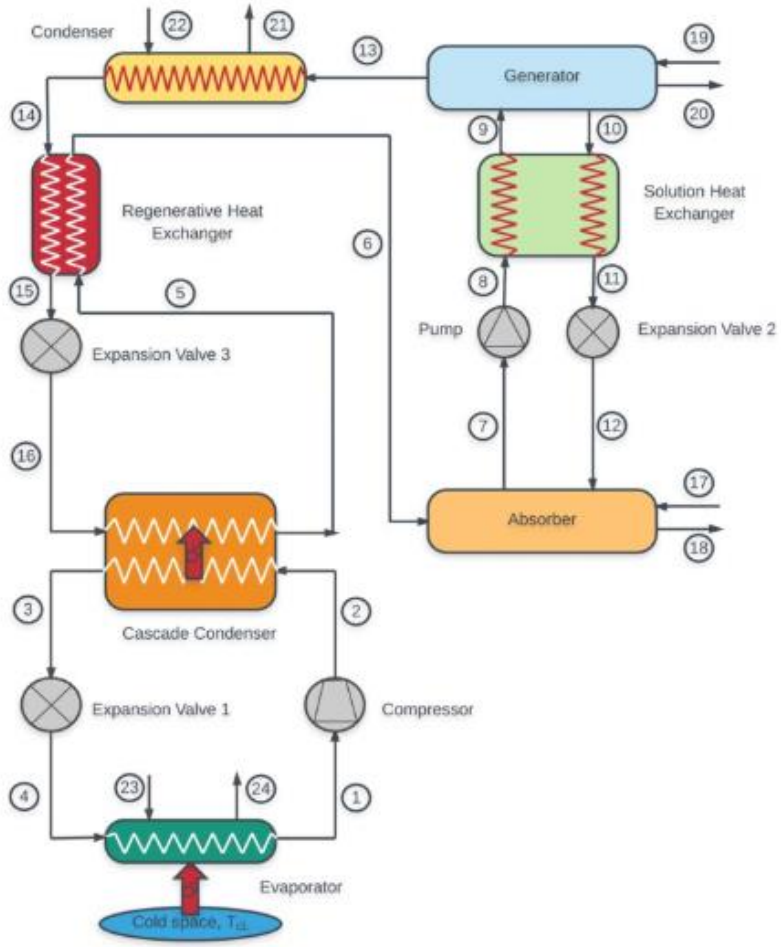
4. COMBINAISON DE SYSTÈMES MÉCANIQUES ET DE SYSTÈMES D'ABSORPTION À ÉNERGIE THERMIQUE

Introduction

Une combinaison de **systèmes mécaniques** (comme la réfrigération par compression de vapeur) et de **systèmes d'absorption à énergie thermique**.

Il intègre deux technologies de refroidissement distinctes pour améliorer la performance globale du système, l'efficacité énergétique et la durabilité.

Ils peuvent être **combinés via le condenseur**, dans lequel la chaleur rejetée par le système de compression de vapeur est utilisée comme chaleur utile par un autre cycle, en tant que système d'absorption. Sinon, cette chaleur serait rejetée vers l'ambiant et perdue. Cela maximise donc l'efficacité énergétique de l'ensemble du système.



Turgut, M., & Turgut, O. (2019). Comparative investigation and multi objective design optimization of a cascaded vapor compression absorption refrigeration system operating with different refrigerants in the vapor compression cycle. Heat and Mass Transfer, 55. https://doi.org/10.1007/s00231-018-2430-3

2.4. COMBINAISON DE SYSTÈMES MÉCANIQUES ET DE SYSTÈMES D'ABSORPTION ALIMENTÉS PAR L'ÉNERGIE THERMIQUE

Paramètres clés

Dans ce cas, le COP prend en compte l'ensemble des entrées et sorties du système :

COP_c : 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 électrique par pompe

$$COP = \frac{\dot{Q}_{cas,cond}}{(\dot{Q}_g + \dot{W}_c + \dot{W}_P)}$$

Turgut, M., & Turgut, O. (2019). Comparative investigation and multi objective design optimization of a cascaded vapor compression absorption refrigeration system operating with different refrigerants in the vapor compression cycle. Heat and Mass Transfer, 55. https://doi.org/10.1007/s00231-018-2430-3

2.4. COMBINAISON DE SYSTÈMES MÉCANIQUES ET DE SYSTÈMES D'ABSORPTION ALIMENTÉS PAR L'ÉNERGIE THERMIQUE

Applications de ce système

Réfrigération industrielle

Réseaux de froid

Centrales thermiques et électriques combinées (CHP)

Chauffage et Refroidissement combinés (CHC)

Industries chimiques et pétrochimiques

Centres de données

Réseaux de chaleur et de froid avec récupération de la chaleur perdue

Transport réfrigéré

Patinoires et arènes sportives

Applications pharmaceutiques et médicales

Système de refroidissement solaire

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

2.5.CONCLUSIONS

- Les refroidisseurs refroidis par air et refroidis par eau présentent des différences significatives en termes d'avantages et d'inconvénients.
- Le COP et l'EER quantifient le fonctionnement nominal des pompes à chaleur et des refroidisseurs.
- Les COP et EER saisonniers prennent en compte le fonctionnement en toute saison, offrant une image plus détaillée de la consommation réelle.
- Les refroidisseurs à absorption s'activent par chaleur au lieu d'électricité. Ils peuvent être alimentés au gaz, mais leur durabilité est maximisée lorsqu'ils sont combinés à des réseaux renouvelables, de chaleur usagée ou de chauffage urbain.
- Deux fluides dans les refroidisseurs d'absorption doivent être pris en compte pour l'application particulière.
- Le stockage d'énergie thermique est considéré comme un stockage de chaleur sensible (réservoir d'eau chaude). Cependant, les matériaux à changement de phase et le stockage d'énergie thermochimique sont prometteurs à moyen et long terme.
- Une combinaison de systèmes de compression et d'absorption de vapeur peut maximiser la production de refroidissement. Cela est particulièrement utile dans les applications de chauffage et de refroidissement simultanés pour diversifier la production d'énergie thermique et le décalage des pics.

3. RÉFRIGÉRANTS



3.1. INTRODUCTION AUX RÉFRIGÉRANTS

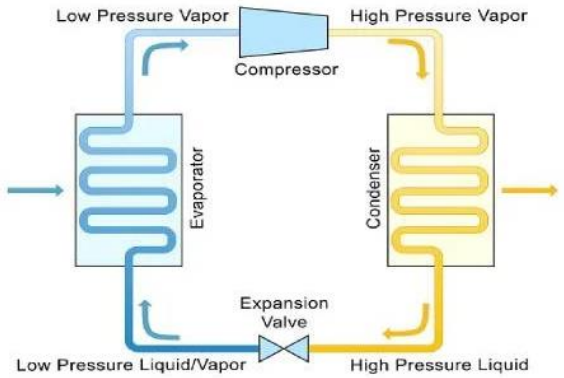
Définition :

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

absorber la chaleur à basse température et pression et

La libérer à une température et pression plus élevées.

Ce transfert de chaleur se produit lorsque le réfrigérant 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.







Super Radiator Coils. (n.d.). Custom commercial & industrial heat exchangers. https://www.superradiatorcoils.com/

Sdya Chem. (n.d.). Refrigerant R600a isobutane gas. https://es.sdya-chem.com/refrigerant-gas/isobutane-r600a/refrigerant-r600a-isobutane-gas.html

Advanced Commercial. (n.d.). Commercial HVAC, refrigeration, plumbing & building automation solutions. https://advanced-commercial.com/

3.1. INTRODUCTION AUX RÉFRIGÉRANTS

Réfrigérant primaire vs. réfrigérant secondaire

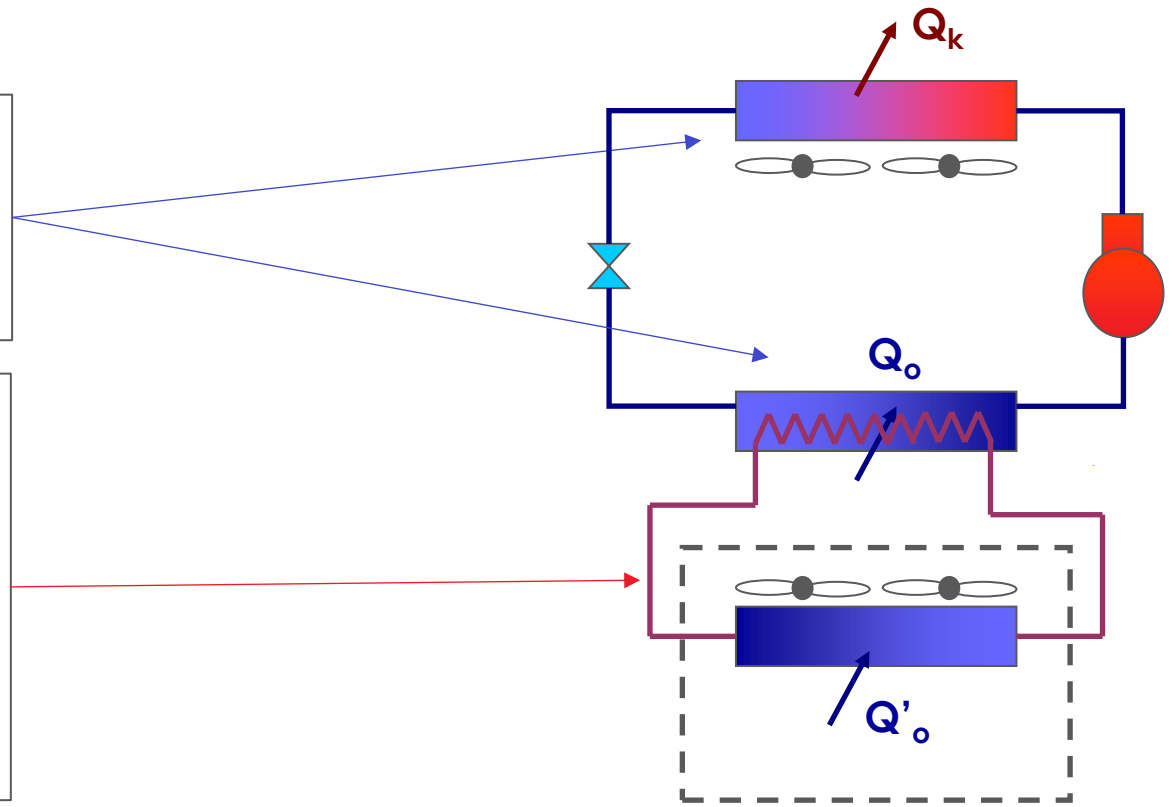
Réfrigérant primaire, également appelé fluide de travail.

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

Réfrigérant secondaire, également connu sous le nom de :

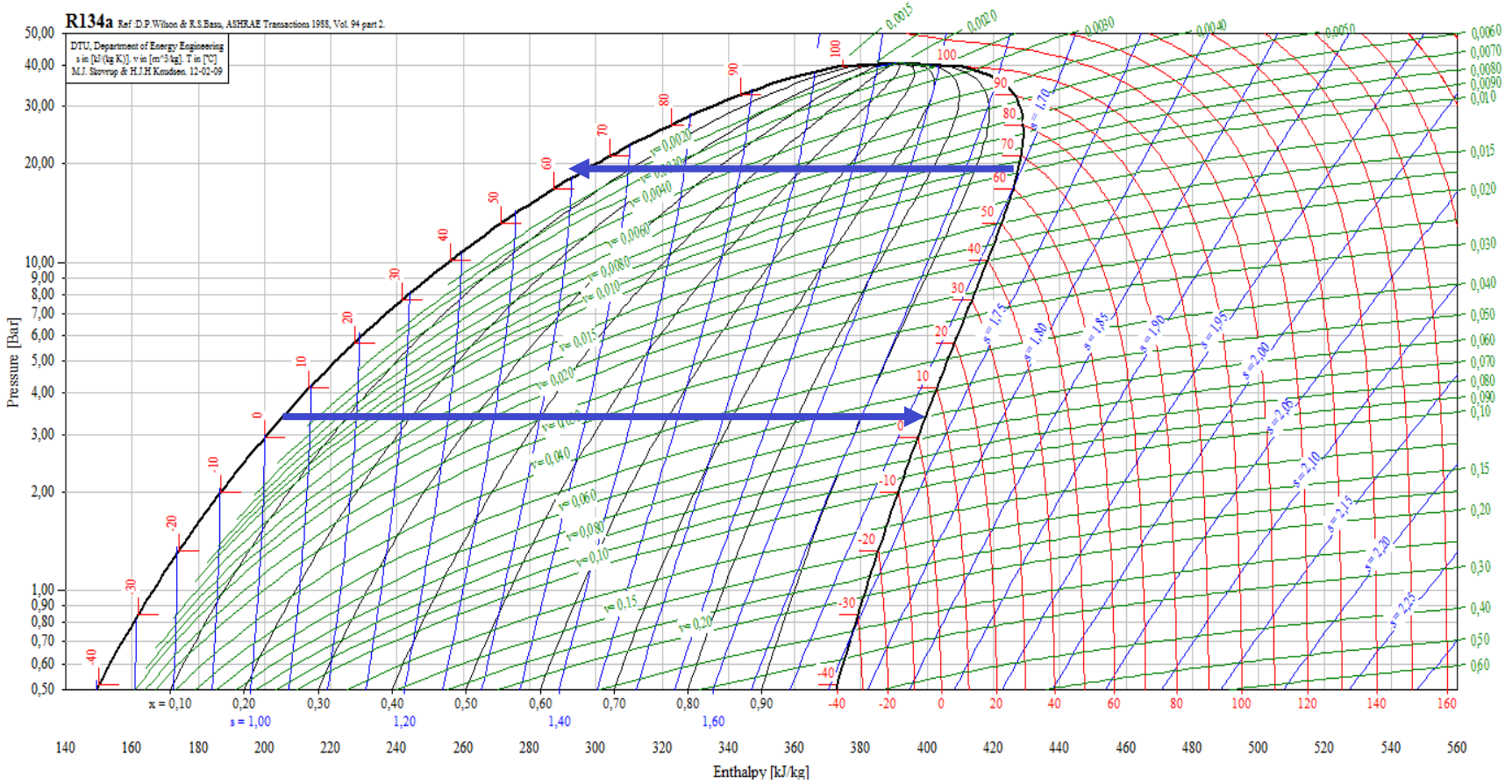
Fluide secondaire
Liquide de refroidissement secondaire
Fluide de transfert de chaleur

Tout fluide utilisé pour transférer la chaleur des produits à refroidir vers le réfrigérant primaire



3.1. INTRODUCTION AUX RÉFRIGÉRANTS

Classification de base



Fluide pur : La pression et la température sont constantes sous changement de phase, donc l'une peut définir l'autre.

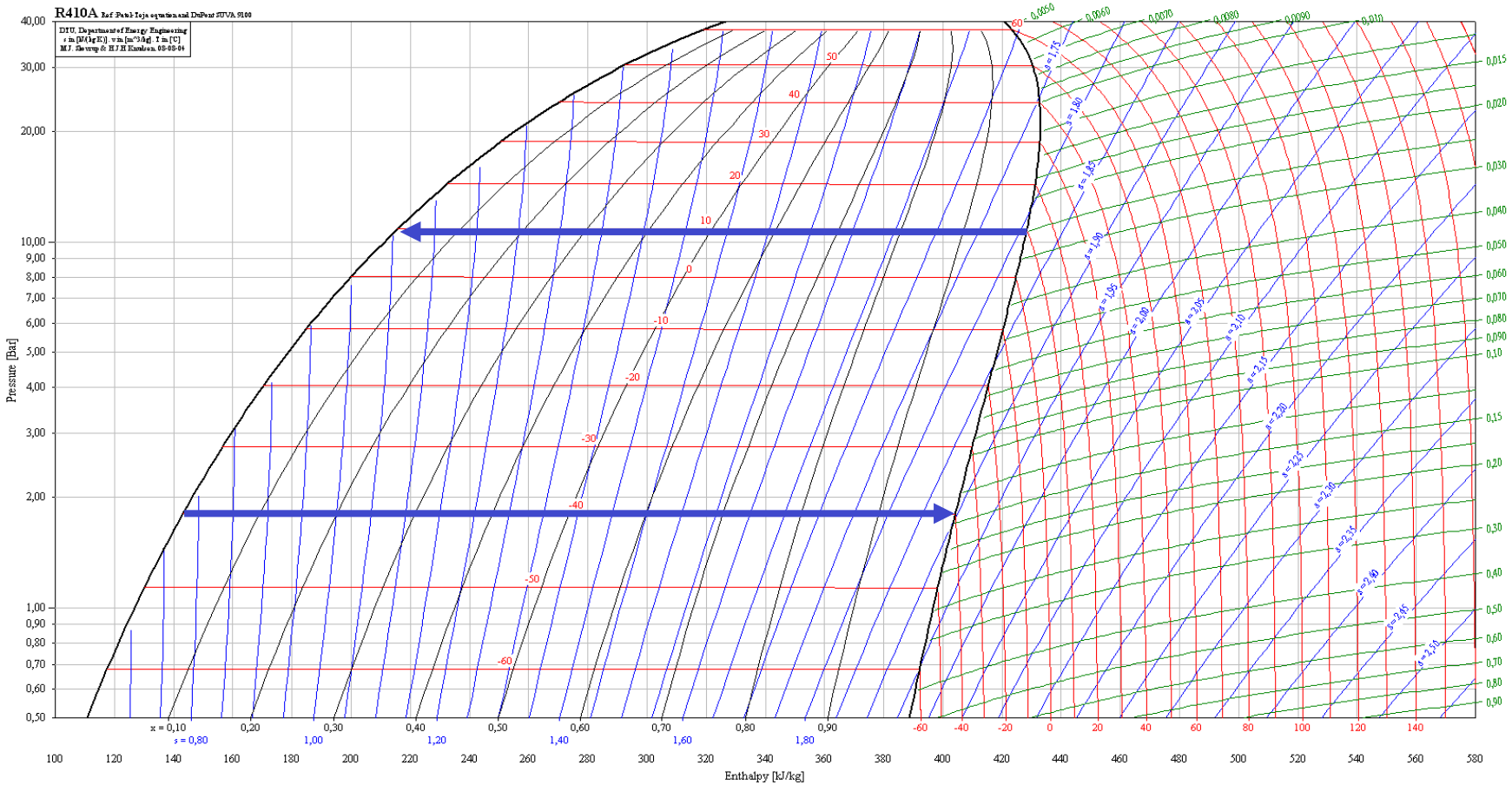
Lors du changement de phase :

P→T and T→P

Wilson, D. P., & Basu, R. S. (1988). [Title of the article]. ASHRAE Transactions, 94(2).

3.1. INTRODUCTION AUX RÉFRIGÉRANTS

Classification de base

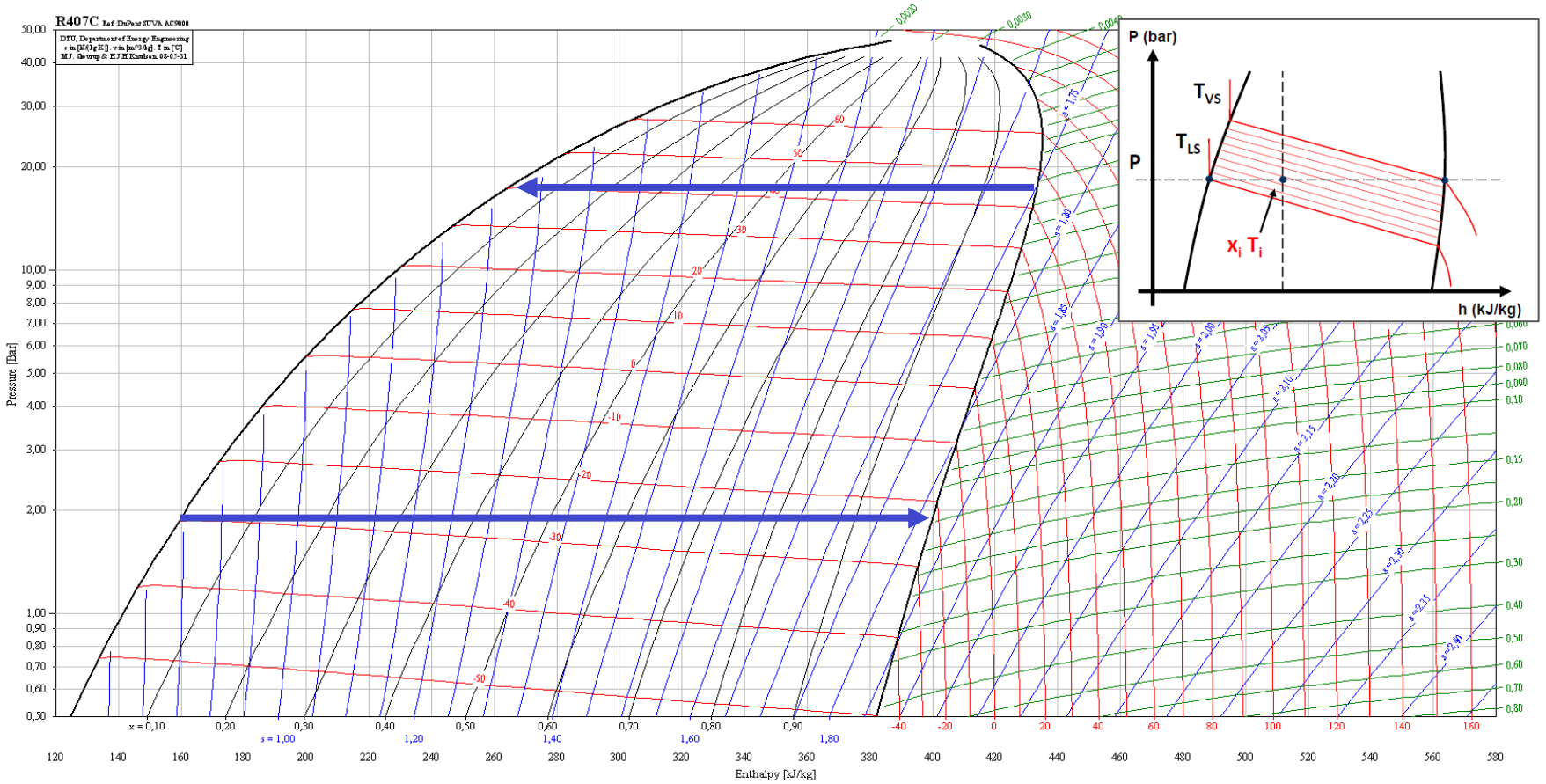


Mélange azéotropique :
La composition et la température ne changent pas de manière significative lorsque l'azéotrope s'évapore ou se condense sous pression constante.

E. I. du Pont de Nemours and Company. (n.d.). DuPont Suva 9100 refrigerant: Properties, uses, storage, and handling.

3.1. INTRODUCTION AUX RÉFRIGÉRANTS

Classification de base



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

E. I. du Pont de Nemours and Company. (n.d.). DuPont Suva AC9000 refrigerant: Properties, uses, storage, and handling.

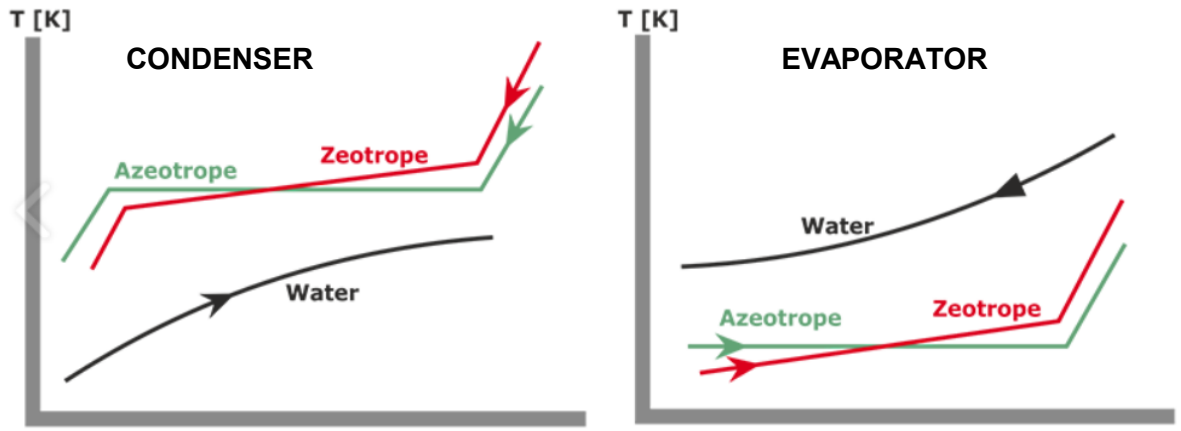
3.1. INTRODUCTION AUX RÉFRIGÉRANTS

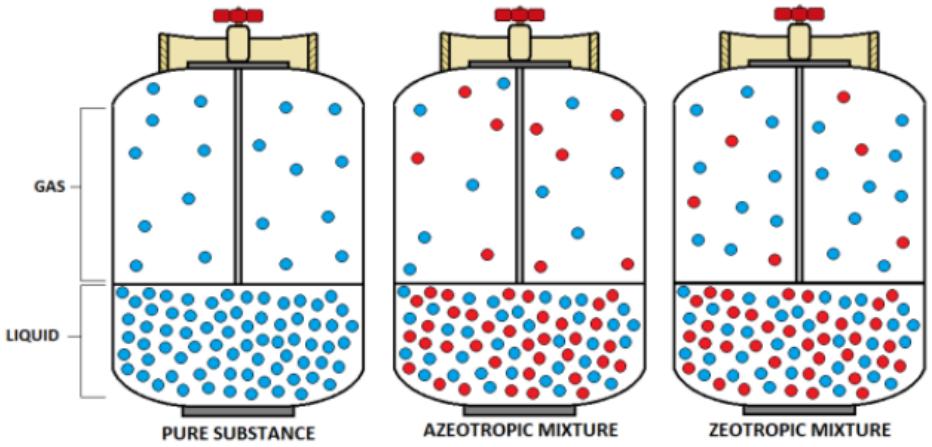
Classification de base

Mélanges :

Les mélanges zéotropiques nécessitent des mesures spéciales pour la détermination des propriétés, le calcul des paramètres, la manipulation, etc.

Un mélange zéotropique avec un glissement à température plus basse (inférieur à 0,5 à 1 K, selon la source) est dit quasi-azéotropique et peut être considéré comme un mélange azéotrope en termes pratiques.

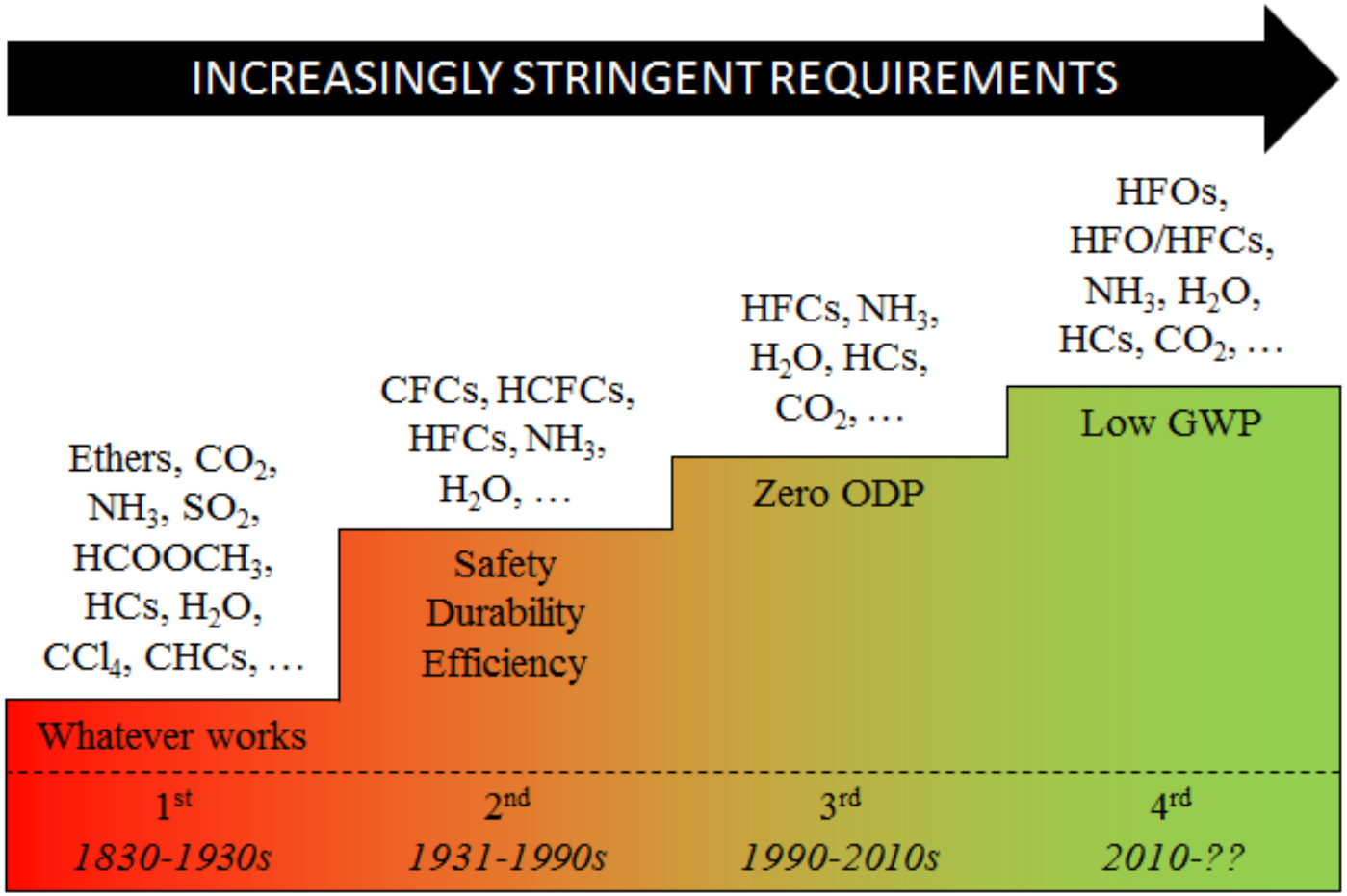




SWEP International AB. (n.d.). Brazed plate heat exchangers for HVAC and industrial applications. https://www.swepgroup.com/

Silva-Alvarado, O., Sánchez-Cruz, F. A., & [Other Authors]. (2022). Zeotropic refrigerants: Image analysis for void fraction measurement at evaporator's inlet for R-404A. In Memorias del XXVIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM (pp. 162–[End Page]). Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. https://somim.org.mx/memorias/memorias2022/articulos/A4_107.pdf

3.2. HISTOIRE ET ÉVOLUTION

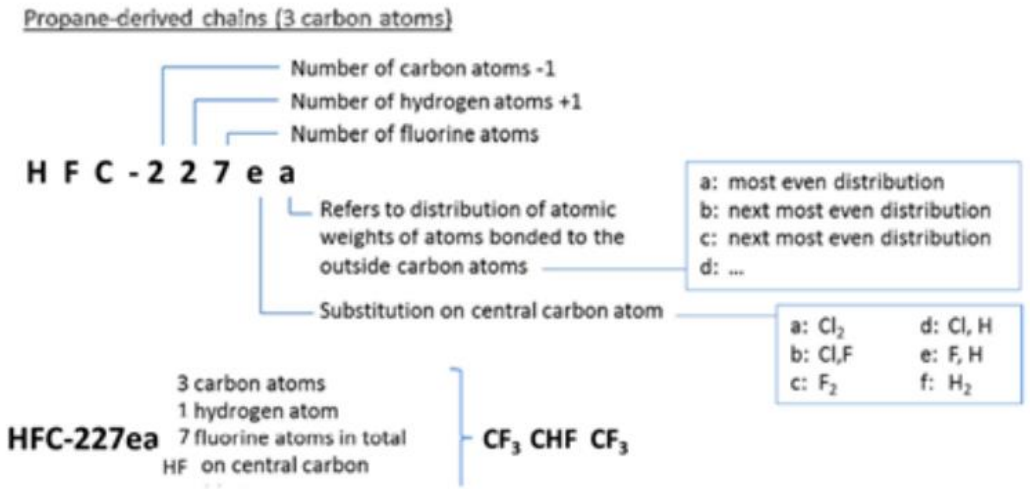


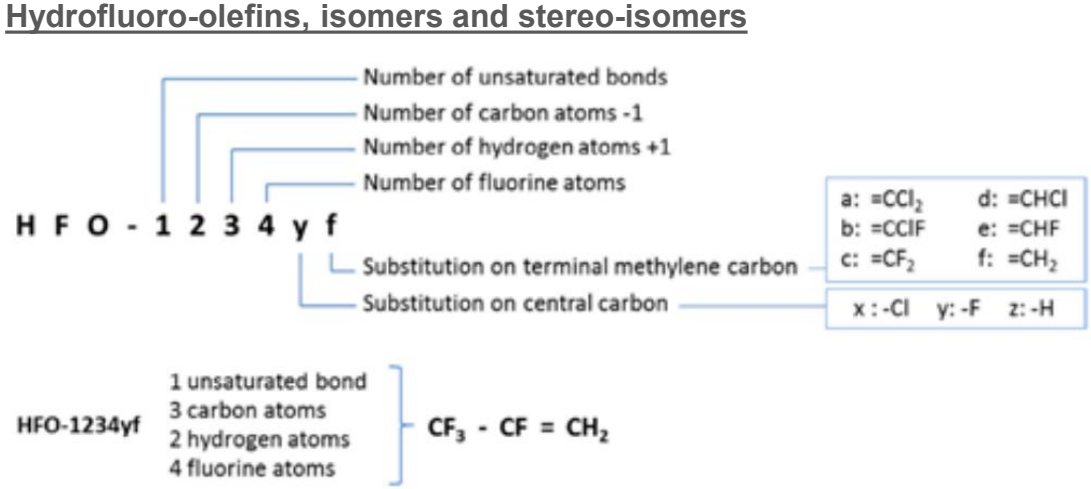
Mota-Babiloni, Adrián. (2016). Analysis of low Global Warming Potential fluoride working fluids in vapour compression systems. Experimental evaluation of commercial refrigeration alternatives. 10.13140/RG.2.1.1444.5685.

3.3. DÉSIGNATION ET PROPRIÉTÉS

Désignation

La norme ASHRAE 34 - fournit un système de dénomination pour les réfrigérants courants et leur attribue des classifications de sécurité.





Pour les doubles liaisons, les configurations cis (substituts du même côté de la double liaison) et trans (substituts de chaque côté de la double liaison) peuvent devoir être indiquées.
Pour HFO-1336mzz(Z), le « m » indique CF3 (les lettres de a à l indiquent d'autres groupes) et les deux « z » indiquent H sur le carbone central C=C

European Fluorocarbons Technical Committee. (n.d.). European Fluorocarbons Technical Committee (EFCTC). https://www.fluorocarbons.org/

3.3. DÉSIGNATION ET PROPRIÉTÉS

Propriétés : Sécurité

Toxicité | Inflammabilité

Défini par ASHRAE 34 (International), puis EN378 (Europe), dépend alors du pays

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

Inflammabilité croissante

Toxicité croissante

Cette classification influence la quantité maximale de charge de réfrigérant pour chaque application de réfrigération

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

3.4. IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Résumé des indicateurs environnementaux

ODP : Mesure la décomposition de l'ozone stratosphérique par rapport à R-11.

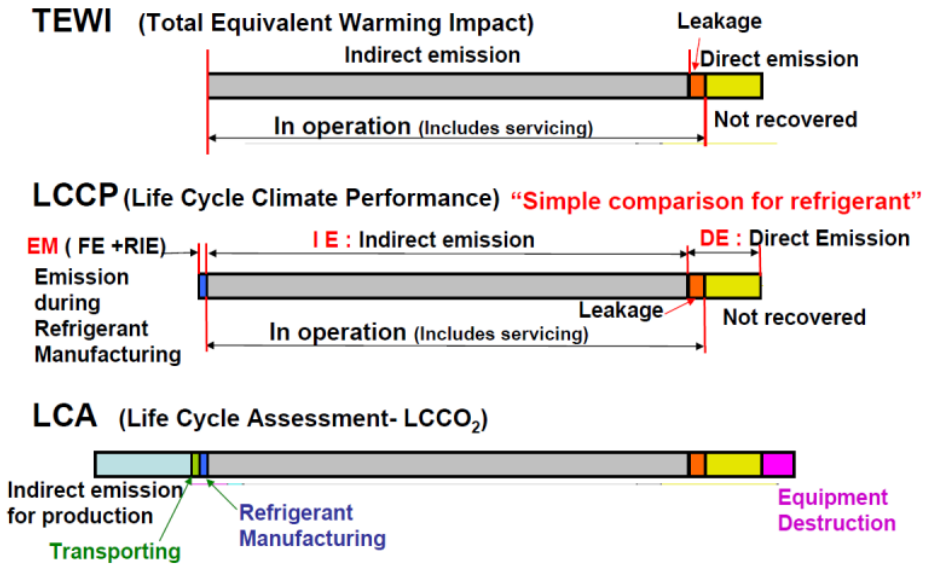
GWP : Mesure l'impact relatif d'un réfrigérant sur la chaleur par rapport au CO_2 sur une période donnée.

TEWI : Évalue l'effet combiné de réchauffement des fuites de réfrigérant et de la consommation d'énergie, mais n'inclut pas la fabrication.

LCCP : Prend en compte l'impact climatique total sur l'ensemble du cycle de vie d'un réfrigérant, y compris la production, l'utilisation et l'élimination.

LCA : Évalue globalement les impacts environnementaux dans plusieurs catégories tout au long de la vie d'un produit.

Représentation graphique des émissions équivalentes CO2 :



3.4. IMPACT ENVIRONNEMENTAL

PRG

Le Potentiel de Réchauffement Global (PRG ou GWP) mesure l'impact relatif d'un gaz à effet de serre en termes de capacité à piéger la chaleur sur une période donnée, généralement 20, 100 ou 500 ans, comparé au dioxyde de carbone (CO_2), qui a par définition un GWP de 1. GWP prend en compte la quantité d'énergie qu'un gaz absorbe, sa durée de vie atmosphérique et sa concentration au fil du temps. Le GWP d'une substance sur une période tt est donné par l'équation suivante :

$$\mathrm{PRG}_{\mathrm{gaz,t}} = \frac{\int_0^{\mathrm{T}} \mathrm{a}_{\mathrm{gaz}} \cdot \mathrm{C}_{\mathrm{gaz}}(\mathrm{t})\mathrm{dt}}{\int_0^{\mathrm{T}} \mathrm{a}_{\mathrm{CO_2}} \cdot \mathrm{C}_{\mathrm{CO_2}}(\mathrm{t})\mathrm{dt}}$$

où :

a_{gas} : Efficacité radiative du gaz (combien de chaleur il retient par unité de masse).
$C_{\mathrm{gas}(t)}$: Concentration du gaz dans l'atmosphère sur time.
T : horizon temporel (typiquement 20, 100 ou 500 ans).
$a_{\mathrm{CO_2}}$: Efficacité radiative du CO_2.
$C_{\mathrm{CO_2}}(t)$: Concentration de CO_2 au fil du temps.

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

3.4. IMPACT ENVIRONNEMENTAL

TEWI

Émissions directes : fuites accidentelles de réfrigérants et pertes lors des phases d'exploitation, d'entretien et d'élimination en fin de vie. Il est calculé comme suit :

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

- Taux de fuite : pourcentage annuel de fuite du réfrigérant.
- Charge : Charge totale du réfrigérant (masse de réfrigérant dans le système).
- Émissions en fin de vie : pourcentage de réfrigérant perdu ou non récupéré à l'élimination.

Émissions indirectes : Émissions équivalentes CO_2 résultant de la consommation d'énergie du système sur toute sa durée de vie. Il est calculé 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.

3.4. IMPACT ENVIRONNEMENTAL

LCCP

La Performance climatique du cycle de vie (LCCP) évalue l'impact climatique total d'un réfrigérant tout au long de son cycle de vie, tenant compte à la fois des émissions directes et indirectes. Les émissions directes surviennent lorsque le réfrigérant est libéré (par fuites ou élimination), tandis que les émissions indirectes proviennent de l'énergie nécessaire au fonctionnement des équipements réfrigérants. 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 réfrigérants pendant l'exploitation et l'entretien :

$$E_{direct} = GWP \times montant\ fuité$$

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

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

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

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

3.4. IMPACT ENVIRONNEMENTAL

LCA

L'analyse du cycle de vie (ACV ou LCA) 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 au LCCP, l'ACV couvre diverses catégories d'impact au-delà du changement climatique, telles que l'épuisement des ressources, l'acidification et l'eutrophisation.
L'impact sur le cycle de vie d'un réfrigérant ou d'un système peut être calculé avec :

$$\mathrm{LCA}_{\mathrm{total}} = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{Inventory}_i \times \mathrm{Impact\ Factor}_i$$

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

3.5. RÉFRIGÉRANTS ACTUELS ET APPLICATIONS

La plupart des réglementations au fil du temps

Protocole de Montréal(1987)

Protocole de Kyoto (1995)

Accord de Paris(2015)

Amendement de Kigali au Protocole de Montréal (2016)



Règlementation F-gas and Cimatisation mobile Directive (2006)

Règlementation F-gas (2014)

Révision F-gas (2024)

Protection contre la couche d'ozone
HCFC and CFC
HFC

Changement climatique
HFC
HFO, NatRef

PFAS & TFA
HFO??
NatRef

3.5. RÉFRIGÉRANTS ACTUELS ET APPLICATIONS

TFA

Acide trifluoroacétique (TFA) : composé organofluoré CF3CO2H

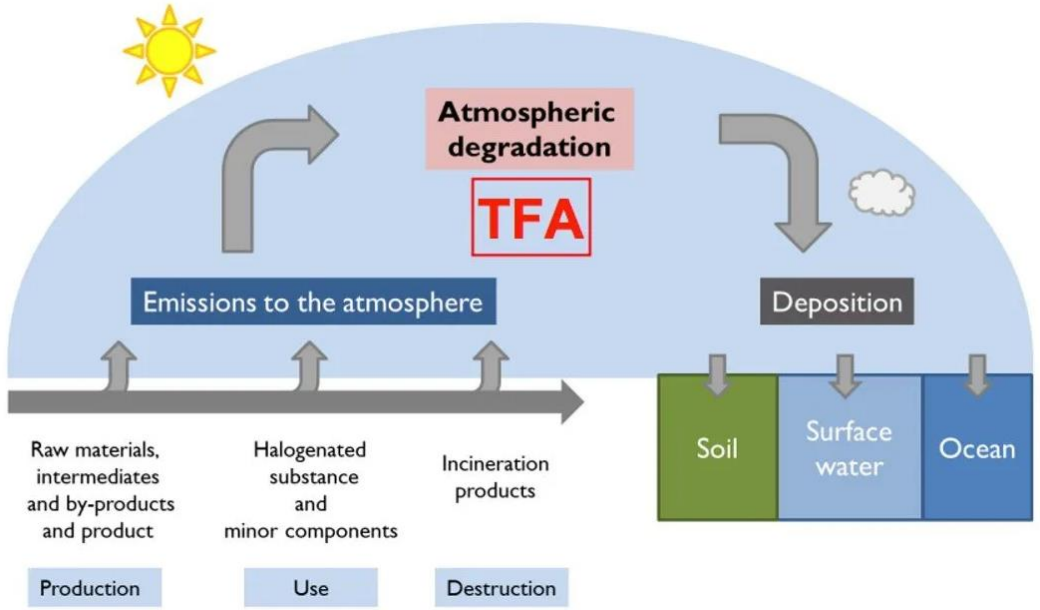
Formé par la décomposition atmosphérique des réfrigérants (produit de dégradation).

Rapport de l'Agence fédérale allemande pour l'environnement.

5 % d'origine humaine (fabrication, agriculture, traitement des eaux usées et réfrigérants).

R1234yf produit 100 % TFA, R134a entre 7 et 20 %, R1234ze(E) moins de 10 %

R1336mzz(Z) produit moins de 20 %, R1233zd(E) seulement 2 %.





VASA. (n.d.). Global PFAS concerns will likely lead to tougher refrigerant controls: Australia opens consultation. https://vasa.org.au/global-pfas-concerns-will-likely-lead-to-tougher-refrigerant-controls-australia-opens-consultation/

3.5. RÉFRIGÉRANTS ACTUELS ET APPLICATIONS

PFAS

Substances alkyliques perfluorées et polyfluorées (PFAS)

Plus de 4 700 « produits chimiques éternels »

Les PFAS peuvent être nocifs pour la santé humaine.

Ils couvrent une gamme de gaz fluorés, y compris certains HFC (R134a, R125, R143a et R152a) et HFO (R1234yf, R1234ze(E) et R1233zd(E)) utilisés dans les applications CVAC. TFA est un PFAS (CF3- et CF2-)

L'État du Maine, aux États-Unis, est devenu le premier gouvernement à interdire la vente de produits contenant des PFAS à compter du 1er janvier 2030

Voir le rapport Agence norvégienne de l'environnement



Western Lake Superior Sanitary District. (n.d.). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). https://wlssd.com/education/pollution-prevention/per-and-polyfluoralkyl-substances-pfas/

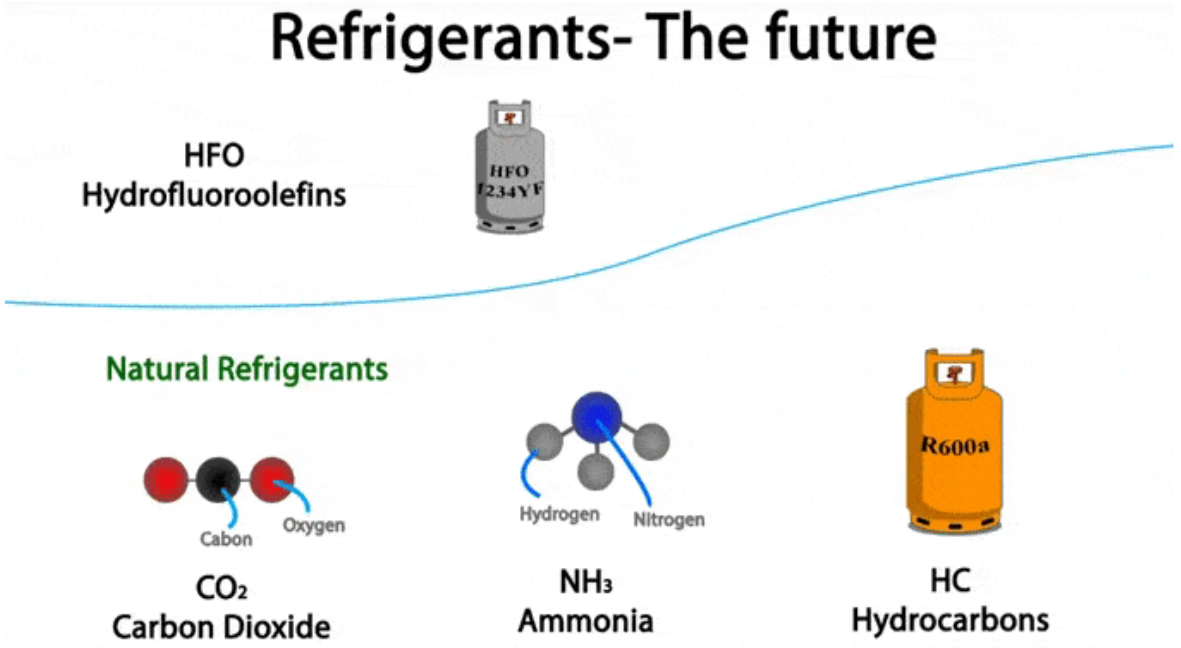
3.5. RÉFRIGÉRANTS ACTUELS ET APPLICATIONS

Réfrigérants naturels

Les réfrigérants naturels sont considérés comme une option plus sûre et plus durable pour remplacer les HFO.

Ces réfrigérants ne génèrent pas de sous-produits nocifs comme les TFA ou le HF lors de leur dégradation dans l'atmosphère, et ils n'ont pas de potentiel d'appauvrissement de l'ozone (ODP) et un GWP beaucoup plus faible.

Les plus courants sont : le CO_2, le NH_3 et les hydrocarbures.



The Engineering Mindset. (n.d.). Future of refrigerants. https://theengineeringmindset.com/refrigerant-types-future/future-of-refrigerants/

3.5. RÉFRIGÉRANTS ACTUELS ET APPLICATIONS

Réfrigérants les plus couramment utilisés (synthétiques)

Réfrigerant	Type	Application	GWP	Classification de sécurité
R-410A	HFC	Courant dans les pompes à chaleur réversibles, bien que son gros GWP entraîne son abandon au profit de réfrigérants à plus faible GWP.	2088	A1
R-32	HFC	Les systèmes résidentiels et commerciaux de petite taille sont une alternative à faible GWP au R-410A.	675	A2L
R-134a	HFC	Largement utilisé dans des applications commerciales, bien qu'il soit progressivement retiré en raison de son gros GWP.	1430	A1
R-513A	HFO/HFC	Utilisé dans des applications commerciales et industrielles comme remplaçant à faible GWP du R-134a.	573	A1
R-450A	HFO/HFC	Un autre remplacement à faible GWP pour le R-134a dans les systèmes nécessitant un chauffage et un refroidissement à double usage.	547	A1
R-1234yf	HFO	Principalement utilisé dans la climatisation automobile et de plus en plus dans les pompes à chaleur pour les systèmes industriels et commerciaux.	<1	A2L
R-1234ze(E)	HFO	Systèmes industriels et commerciaux.	<1	A2L
R-1233zd(E)	HFO	Principalement utilisé dans les grands refroidisseurs et pompes à chaleur pour les bâtiments industriels et commerciaux.	1	A1

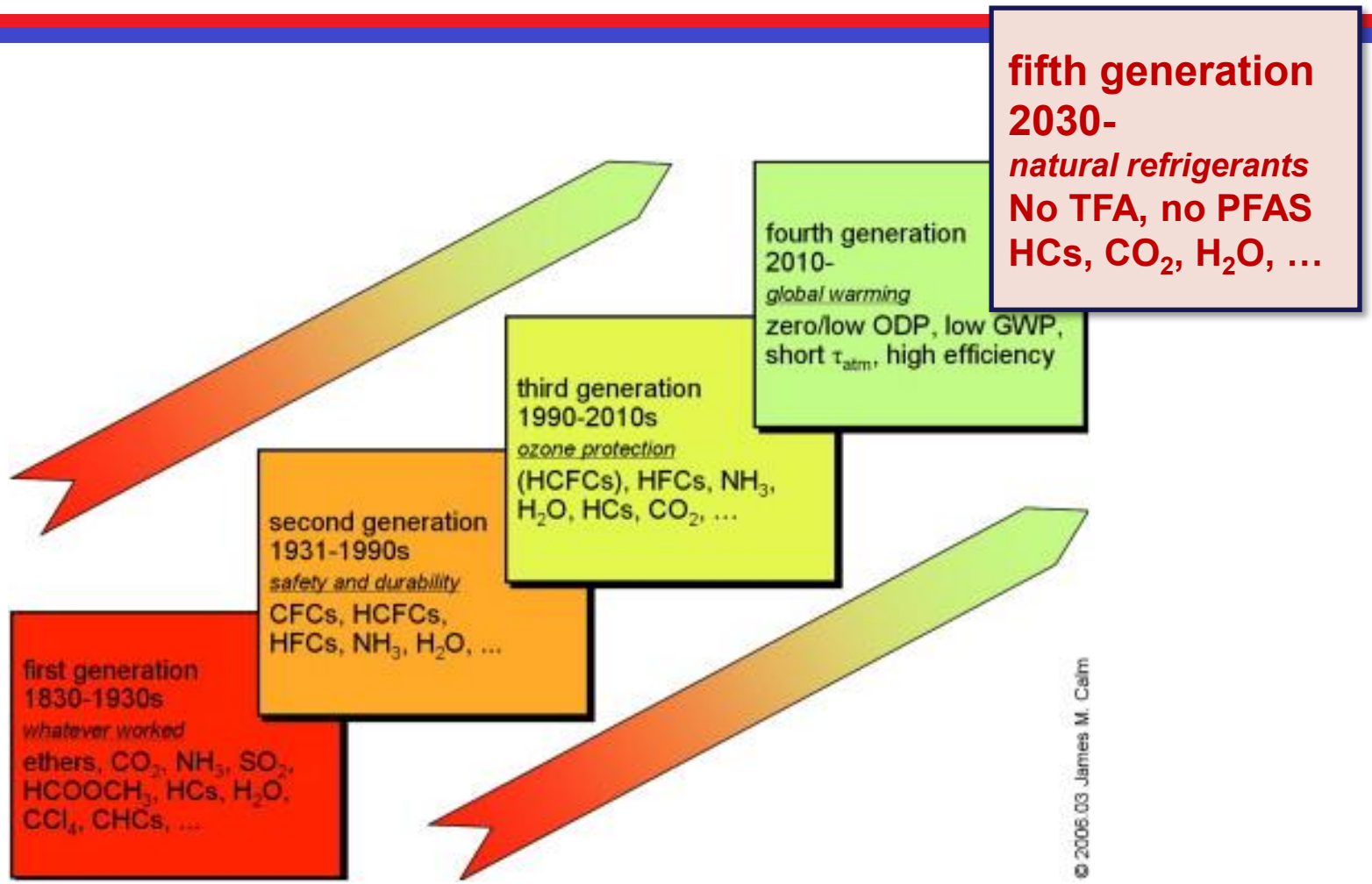
3.5. RÉFRIGÉRANTS ACTUELS ET APPLICATIONS

Réfrigérants les plus couramment utilisés (naturels)

Réfrigerant	Type	Application	GWP	Classification de sécurité
R-744 (CO_2)	Naturel	Utilisé dans la réfrigération commerciale et industrielle, les pompes à chaleur pour le chauffage de l'eau et les supermarchés. Le CO_2 est privilégié pour son très faible GWP, bien que sa haute pression de fonctionnement nécessite des conceptions de systèmes spécialisées.	1	A1
R-290 (propane)	Naturel	Employé dans les systèmes résidentiels et commerciaux pour le chauffage et la climatisation, en particulier dans les systèmes de faible à moyenne capacité.	3	A3
R717 (NH_3)	Naturel	Principalement utilisé dans la grande réfrigération industrielle et commerciale, comme la transformation alimentaire et le stockage frigorifique	0	B2L
R-600 (n-butane)	Naturel	Utilisé dans les petits appareils réfrigérés, tels que les réfrigérateurs domestiques et certains congélateurs commerciaux.	3	A3
R-600a (isobutane)	Naturel	Couramment utilisé dans les réfrigérateurs domestiques, les petits congélateurs commerciaux et les pompes à chaleur.	3	A3

3.6. AVENIR DES RÉFRIGÉRANTS

En observant l'histoire et l'évolution, la tendance réelle est de revenir aux réfrigérants naturels car ils ne présentent pas d'ODP, un faible GWP, et ne forment pas TFA. Cependant, la sécurité de ces réfrigérants doit être prise en compte et élaborer des stratégies pour rendre les installations contenant des réfrigérants naturels sûres.



James M. Calm, The next generation of refrigerants – Historical review, considerations, and outlook, International Journal of Refrigeration, Volume 31, Issue 7, 2008, Pages 1123-1133, ISSN 0140-7007, https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.01.013.

3.7. CONCLUSIONS

- L’histoire des réfrigérants nous aide à comprendre les exigences standard
- Une fois les applications commerciales de réfrigération et de pompes à chaleur commercialisées, la plupart des efforts se sont concentrés sur la recherche du réfrigérant le plus durable.
- Pour chaque application, il existe un réfrigérant optimal. Cependant, le réfrigérant parfait n’existe pas.
- Un compromis entre les perspectives thermodynamique, technique, de sécurité, économique et environnementale est toujours nécessaire.
- Les réfrigérants alternatifs pour les systèmes existants et nouveaux (en direct ou en rénovation) diffèrent. Ces derniers sont pris en compte lorsque des exigences de sécurité ou des conditions opérationnelles différentes existent.
- L’avenir sera orienté vers les réfrigérants naturels afin d’éviter toute préoccupation environnementale.
- Le DHN et le DCN peuvent aider à transférer la chaleur et utiliser des réfrigérants avec des exigences de sécurité plus strictes, car des systèmes de compression de vapeur grands et isolés peuvent être conçus.

4.1. INTRODUCTION AUX ASPECTS ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

Alternative à

Climatiseurs séparés, pompes à chaleur, refroidisseurs, systèmes VRF

Systèmes traditionnels = une unité par appartement ou zone

Avantages du DCN

Refroidissement centralisé pour plusieurs bâtiments

Meilleure efficacité énergétique

Réduction des coûts d'équipement

Une plus grande durabilité avec un confort égal

Défis

Investissement important dans les infrastructures (canalisations de refroidissement)

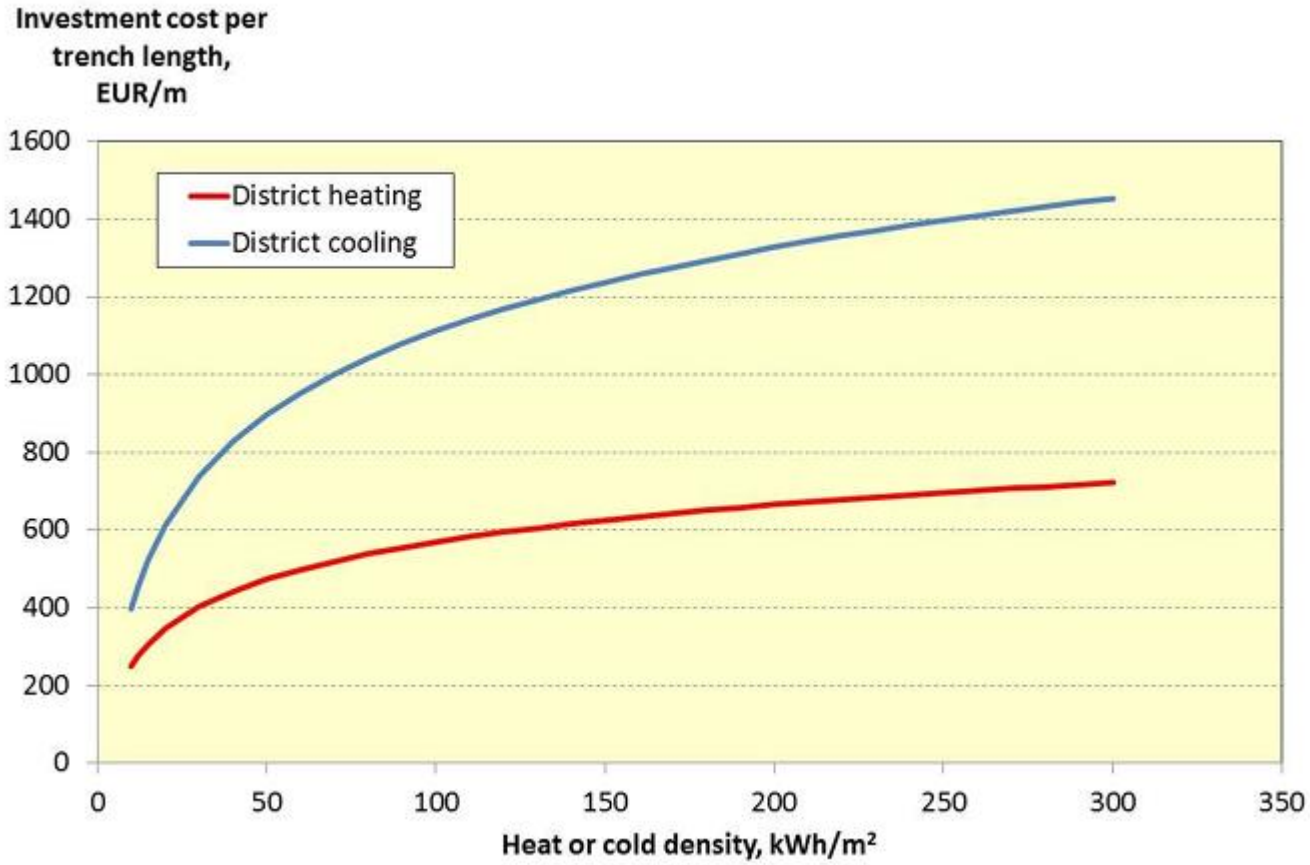
La faisabilité économique dépend de l'échelle et du contexte

Moins de sources de refroidissement des déchets

Considérations

Partage les avantages et inconvénients du chauffage urbain

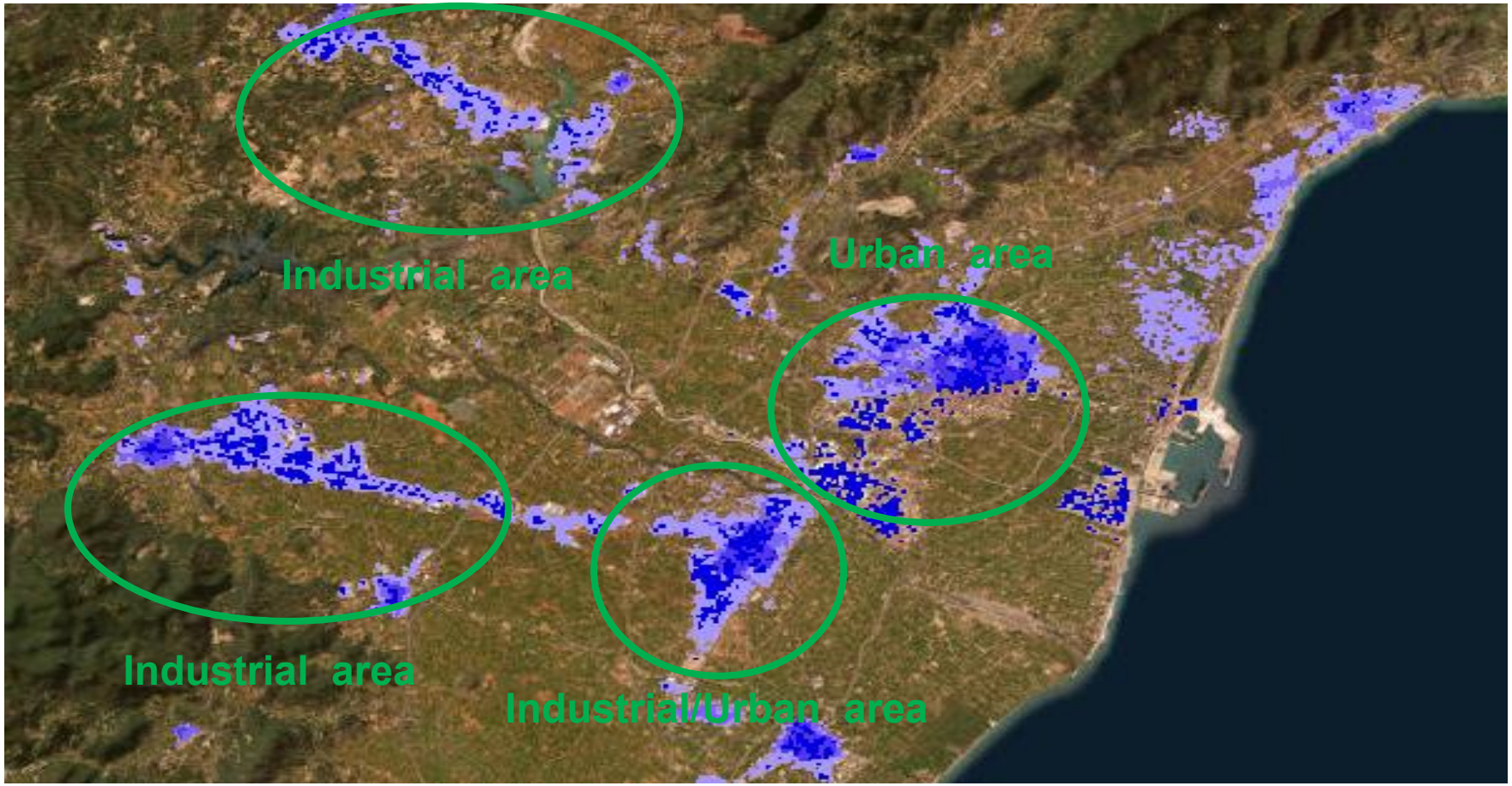
Influencés par des cadres juridiques et politiques



STRATEGO. (2015). WP2 background report 6: Mapping the potential for district heating and cooling. Heat Roadmap Europe. https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2018/09/STRATEGO-WP2-Background-Report-6-Mapping-Potenital-for-DHC.pdf

4.2. DENSITÉ DE LA DEMANDE

Demande de refroidissement (2015), Castellón, Spain



< 1 TJ/km²
1 - 3 TJ/km²
3 - 10 TJ/km²
10 - 30 TJ/km²
> 30 TJ/km²

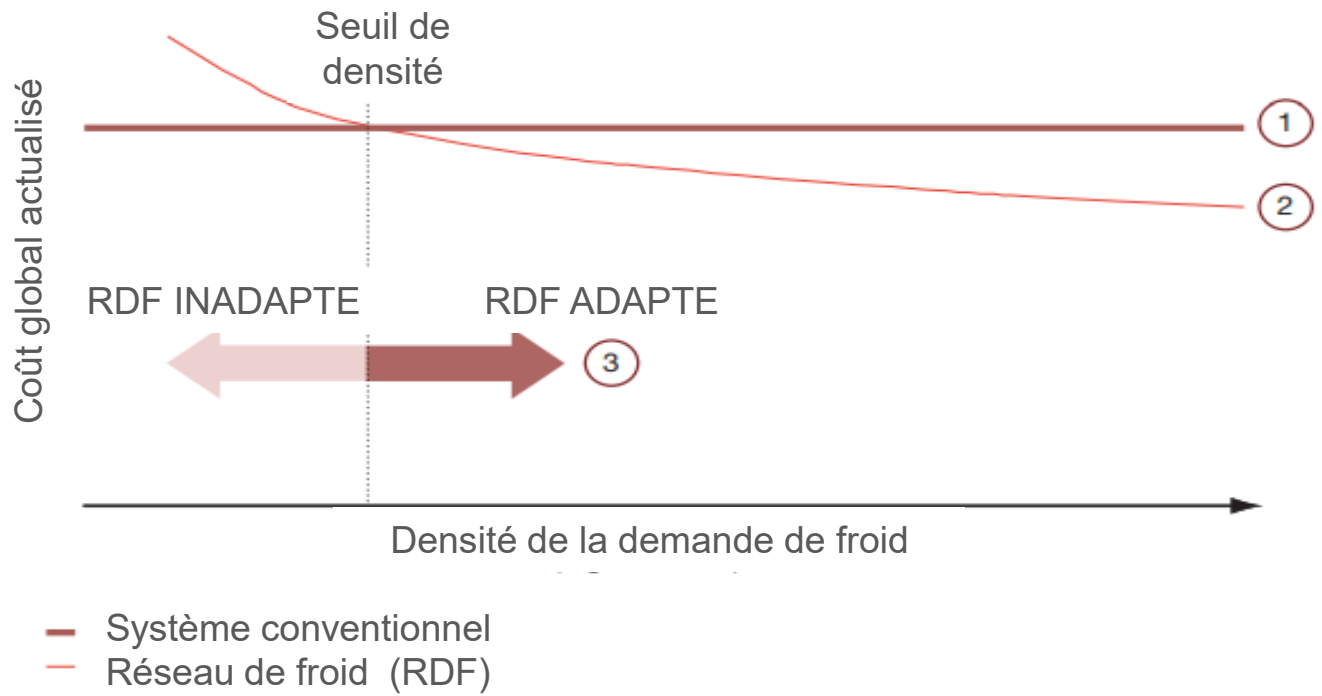
C'est un exemple de municipalités en Espagne qui offrent une opportunité de mettre en place un refroidissement urbain (demande à forte densité)

Heat Roadmap Europe. (2024). Pan-European Thermal Atlas 5.2 [Data set]. Aalborg University. https://heatroadmap.eu/

4.2. DENSITÉ DE LA DEMANDE

Seuil de densité

Cout des technologies de froid versus densité de la demande



1. Les systèmes conventionnels ne dépendent pas de la densité de la demande
2. Les couts des RDF diminuent avec l'augmentation de la densité de la demande grâce à des couts relatifs du réseau plus faibles
3. Les RDF sont plus rentables que les systèmes conventionnels dès que l'on dépasse le seuil de densité

Source: Strategy&

Strategy&. (n.d.). Consultoría de estrategia global: España. PwC. https://www.strategyand.pwc.com/es/es.html

4.2. DENSITÉ DE LA DEMANDE

Analyse de la densité de la demande (1)

1. Collecte et prétraitement des données

Données du bâtiment : Types, utilisation (résidentielle, commerciale, industrielle), tailles, taux d'occupation, demande historique

Données climatiques : température, humidité, rayonnement solaire

Tendances énergétiques : profils de consommation de pic vs. hors pointe

2. Estimation de la charge de refroidissement

Outils de simulation dynamique : par exemple, TRNSYS, EnergyPlus

Charges de refroidissement horaires basées sur l'enveloppe, CVC, gains internes

Identification de la charge de pointe : Crucial pour dimensionner les composants du système

4.3. VIABILITÉ DU REFROIDISSEMENT URBAIN PAR RAPPORT À D'AUTRES TECHNOLOGIES

Coûts en capital : Les systèmes DCN 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.



Coûts opérationnels : Les systèmes DCN 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.



Économies à long terme : le DCN offre des économies significatives sur le long terme, tandis que les systèmes autonomes engendrent des coûts totaux de possession plus élevés.



Revenus : DCN crée des sources de revenus stables via des contrats, contrairement aux systèmes conventionnels.



Risque : Le DCN présente un risque financier initial plus élevé mais des bénéfices stables à long terme ; Les systèmes conventionnels présentent des risques de démarrage moindres mais des coûts d'exploitation volatils.



Avantages externes : Le DCN réduit les charges de pointe urbaines et soutient les économies locales, tandis que les systèmes autonomes ont un impact plus large limité.



4.3. VIABILITÉ DU REFROIDISSEMENT URBAIN PAR RAPPORT À D'AUTRES TECHNOLOGIES

Émissions de carbone

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

Le coût total est réduit de 22 669 M$ pour l'UTR et 20 829 M$ pour les systèmes VRF à 17 395 M$ pour le système DC.

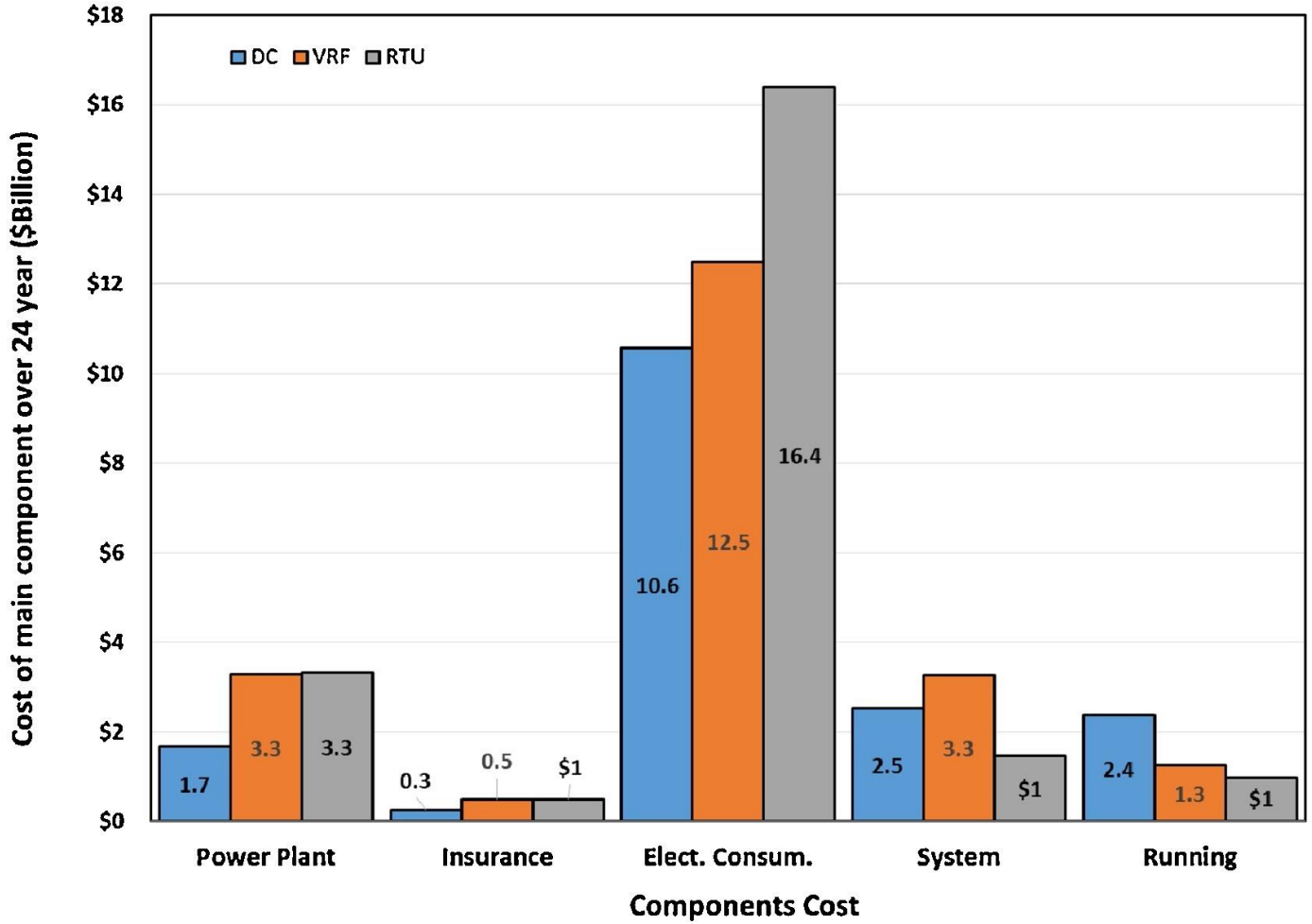
Le système RTU nécessite 660 200 unités de refroidissement, le système VRF en nécessite 220 800 unités, tandis que le système DC n'en nécessite que 624 unités. Cela influence

le nombre d'heures de travail nécessaires pour entrevoir, entretenir et exploiter les unités

espace nécessaire au système de refroidissement sur le toit du bâtiment résidentiel.

nombre de pièces détachées requises

Le risque de fuites de réfrigérant augmente.



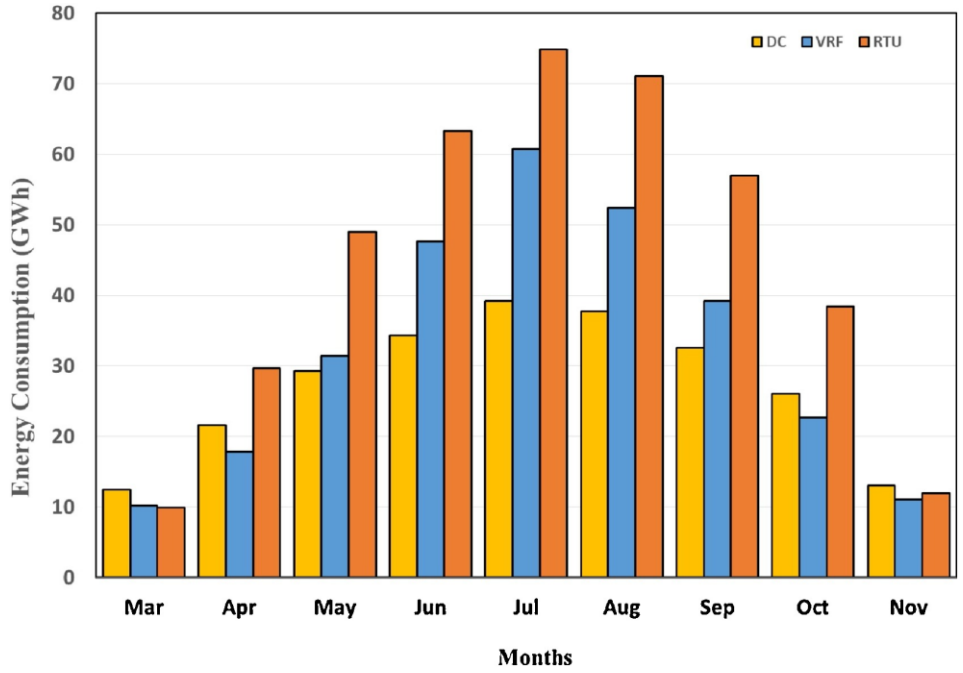
Ali Alajmi, Mohamed Zedan, Energy, cost, and environmental analysis of individuals and district cooling systems for a new residential city, Sustainable Cities and Society, Volume 54, 2020, 101976, ISSN 2210-6707, https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101976.

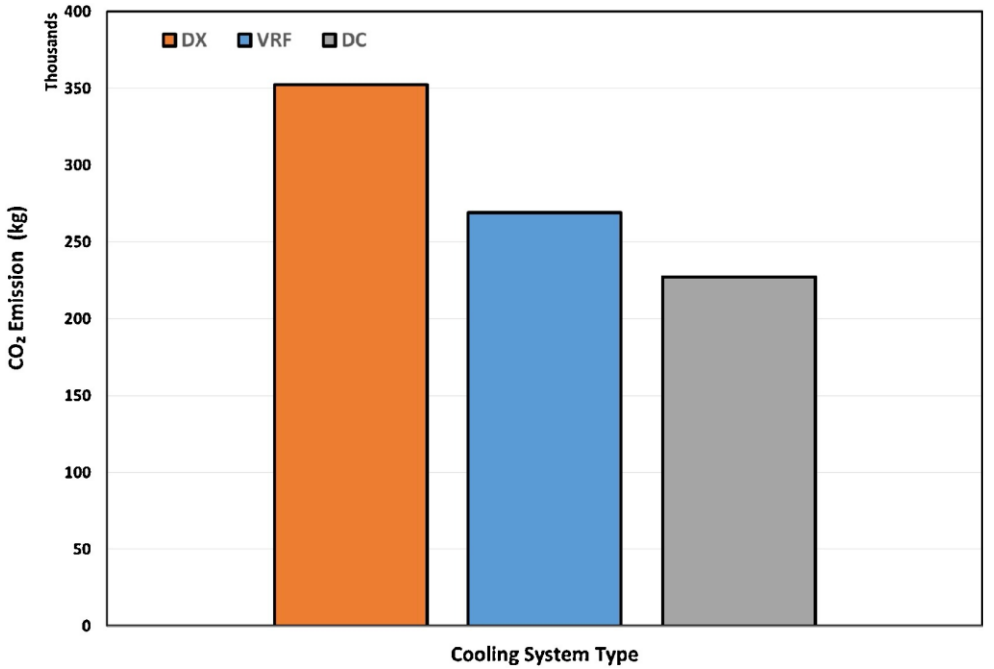
4.4. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU REFROIDISSEMENT URBAIN

Émissions de carbone (2)

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

Un facteur d'émission de CO2 élevé rend encore plus importante l'efficacité énergétique.





Ali Alajmi, Mohamed Zedan, Energy, cost, and environmental analysis of individuals and district cooling systems for a new residential city, Sustainable Cities and Society, Volume 54, 2020, 101976, ISSN 2210-6707, https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101976.

4.5. OPTIMISATION DES TECHNOLOGIES DE REFROIDISSEMENT URBAIN

Optimisation économique pour la réduction des coûts opérationnels

Économies d'échelle

Répartir les coûts d'investissement entre de nombreux consommateurs → un coût unitaire plus bas

Standardiser les équipements (refroidisseurs, pompes, tuyaux) → réduire le temps et le coût de construction

Conception modulaire

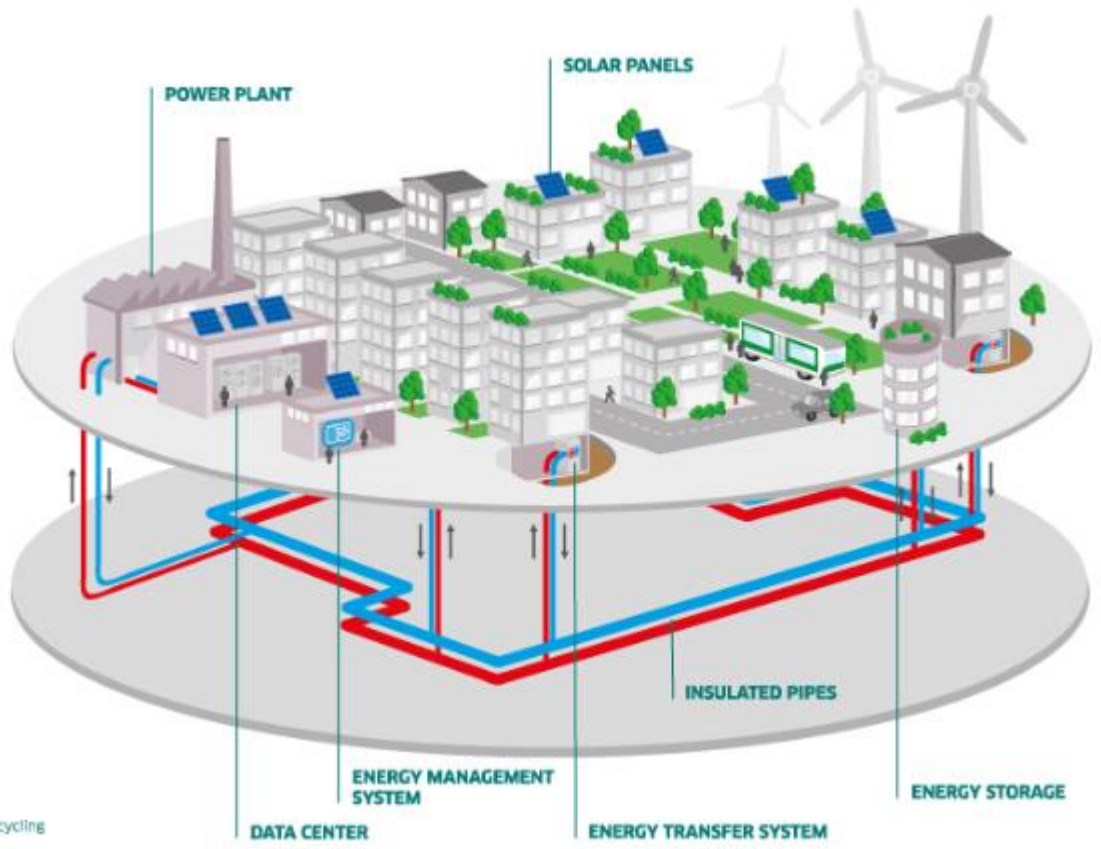
Mise en œuvre par phases → un investissement initial plus faible

Tire profit du foisonnement de la demande → utilisation efficace du capital

Maintenance centralisée

Simplifie l'entretien → réduit les coûts d'entretien

Peut utiliser la maintenance prédictive et l'analyse des données → minimiser les temps d'arrêt et les coûts de réparation



ENGIE España. (n.d.). Red de calefacción urbana de biomasa. https://www.engie.es/red-de-calefaccion-urbana-de-biomasa/

4.5. OPTIMISATION DES TECHNOLOGIES DE REFROIDISSEMENT URBAIN

Optimisation économique pour la réduction des coûts d'investissement

Efficacité énergétique

Utiliser des refroidisseurs à haute efficacité, des entraînements à vitesse variable et des commandes avancées

Le stockage d'énergie thermique permet un refroidissement hors pointe → réduit les coûts d'électricité en pointe

Utilisation de la chaleur résiduelle

Récupérer la chaleur résiduelle provenant de l'industrie et des centrales électriques

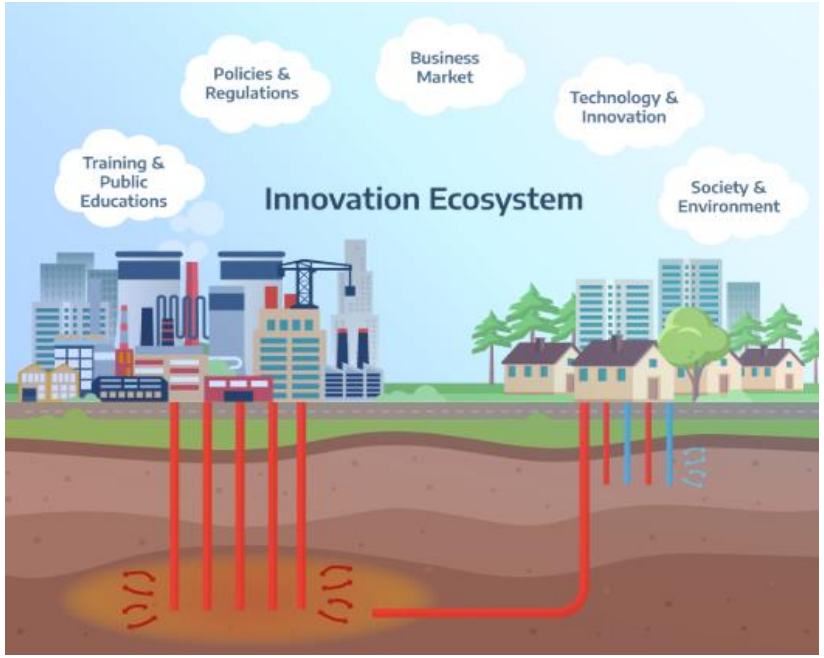
Utiliser des systèmes de sorption et l'injection de refroidissement par évaporateur pour le DCN

Intégration des énergies renouvelables

Intégrer l'électricité solaire thermique, géothermique et à faible émission de carbone

Le refroidissement solaire peut réduire les coûts, surtout dans les zones ensoleillées (la technologie évolue encore).

Réduire la dépendance aux combustibles fossiles et stabiliser les prix de l'énergie



University of Stavanger. (n.d.). Waste heat energy integration, storage and utilization. Future Energy Hub. https://www.uis.no/en/research/future-energy-hub/sustainability-and-environment/waste-heat-energy-integration-storage-and

4.5. OPTIMISATION DES TECHNOLOGIES DE REFROIDISSEMENT URBAIN

Optimisation environnementale

Réfrigérants à faible GWP

Utilisez des réfrigérants synthétiques naturels ou à faible GWP

Détection et entretien avancés des fuites pour minimiser les émissions

Approvisionnement en énergie décarbonée

Se connecter aux réseaux renouvelables (éolien, solaire, hydroélectrique)

Intégrer les énergies renouvelables sur site (par exemple, le solaire photovoltaïque pour les auxiliaires)

Gestion efficace de l'eau

Mettre en place des systèmes de refroidissement en boucle fermée

Utiliser des sources non potables comme les eaux usées traitées

4.5. OPTIMISATION DES TECHNOLOGIES DE REFROIDISSEMENT URBAIN

Conception des systèmes et intégration technologique

Intégration des réseaux intelligents et de l'IoT

Surveillance en temps réel avec des capteurs IoT

Équilibrage dynamique de charge et analyse prédictive

Contrôle intelligent basé sur la demande, la météo et les prix

Réponse à la demande

Décalage du refroidissement aux heures creuses

Réduction des coûts énergétiques et soutien à l'intégration des renouvelables

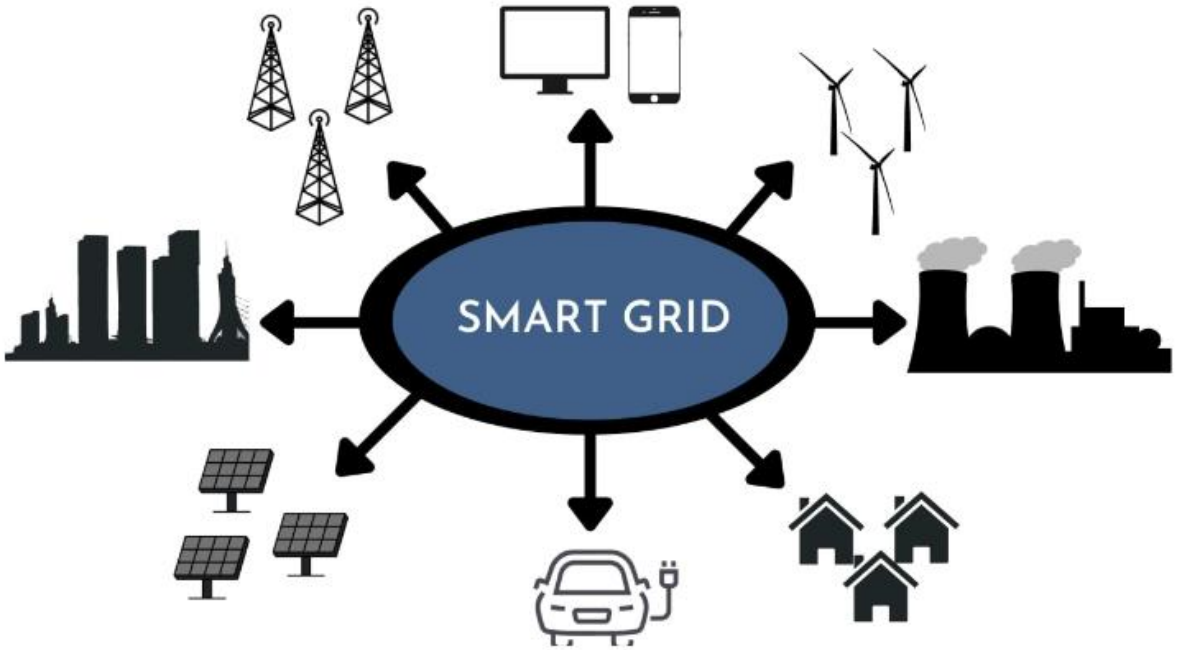
Soulage la contrainte sur le réseau électrique

Systèmes de secours et résilients

Redondance avec refroidisseurs de secours ou stockage thermique

Maintient le service lors des pannes ou des charges de pointe

Évite les coûts d'urgence et garantit la fiabilité



Vikas. (n,d). Smart grid & IoT. LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/smart-grid-iot-vikas-%E0%A4%B5-%E0%A4%95-%E0%A4%B8--jg7ac/

4.6. CONCLUSIONS

- Pour identifier l'adéquation du réseau de refroidissement urbain, une étude de la demande de densité doit être menée. Cette étude doit prendre en compte les bâtiments, les consommateurs industriels et les centres de données.
- L'étude de la demande de densité implique des disciplines supplémentaires par rapport aux projets conventionnels de CVC et de réfrigération, tels que les SIG.
- Si les risques sont soigneusement justifiés et minimisés, un DCN répondant à une demande de densité adéquate sera meilleur que les systèmes de refroidissement conventionnels. Les périodes de remboursement peuvent être attractives.
- Contrairement aux systèmes de refroidissement traditionnels, les gouvernements doivent être impliqués dans le cadre de développement et d'adéquation des réseaux de refroidissement urbain et les promouvoir sous de nombreux angles.
- En plus des avantages traditionnels d'être une technologie plus économe en énergie, le DCN peut aider à réduire les effets d'îlot de chaleur urbain, à réduire les déchets et à faciliter l'intégration avec des technologies durables.
- Le DCN nécessite une optimisation de contrôle plus complexe pour les rendre rentables et économes en énergie, et les derniers développements en IoT et en communications y contribuent.

5. PROJETS RÉALISÉS ET ÉTUDES DE CAS



SHaKE

5.1. Réseaux de froid de BARRIO LA PINADA (Espagne)

Aperçu

Le Barrio La Pinada est un développement urbain privé situé à Paterna, près de la ville de Valence, qui devrait couvrir 320 000 m².

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 zéro, 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).

	Approvisionnement
Technologie	Geothermal/Aerothermal
Energie utilisée	Electricité
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

Creara, & THERMOS Project. (2021). Deliverable 3.9: THERMOS case studies (Version 2.0). Horizon 2020 THERMOS Project. https://www.thermos-project.eu/fileadmin/user_upload/case_studies/210331_THS_D3.9_CREARA_THERMOS_Case_Studies_V2_FINAL-komprimiert.pdf

5.1. Réseaux de froid de BARRIO LA PINADA (Espagne)

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 laissés de côté dans 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 développement. 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 d'euros s'inscrit dans le cadre d'autres développements dans l'énergie géothermique.



Creara, & THERMOS Project. (2021). Deliverable 3.9: THERMOS case studies (Version 2.0). Horizon 2020 THERMOS Project. https://www.thermos-project.eu/fileadmin/user_upload/case_studies/210331_THS_D3.9_CREARA_THERMOS_Case_Studies_V2_FINAL-komprimiert.pdf

5.1. Réseaux de froid de BARRIO LA PINADA (Espagne)

Solution réseau

Réseau primaire	
Longueur	6.76 km
Coût total	1.35 M€
Coût linéaire	200 €/m
Pertes	1.85 GWh/year
Capacité	3.88 MW

Réseau primaire	
Capacité totale requise	3.88 MWp
Production	11.05 GWh/year
Coût en capital	2.14 M€
Coût d'exploitation : O&M	0.12 M€/year
Coût d'exploitation : production de chaleur	0.15 M€/year

Demande de froid	
Pic total de demande	6.16 MW
Demande	9.2 GWh/year
Revenus	0.405 M€/year

Creara, & THERMOS Project. (2021). Deliverable 3.9: THERMOS case studies (Version 2.0). Horizon 2020 THERMOS Project. https://www.thermos-project.eu/fileadmin/user_upload/case_studies/210331_THS_D3.9_CREARA_THERMOS_Case_Studies_V2_FINAL-komprimiert.pdf

5.1. Réseaux de froid de BARRIO LA PINADA (Espagne)

Analyse

	Coût en capital	Coût d'exploitation	Chiffre d'affaires d'exploitation	Valeur actuelle nette
Tuyauterie	-1.35 M€	-	-	-1.35 M€
Alimentation en chaleur	-2.14 M€	-0.27 M€/an	-	-9.35 M€
Demande	-	-	0.41 M€/an	-10.74 M€
Émissions	Non incluses à ce stade			
Réseau	**-3.49 M€**	**-0.27 M€/an**	**0.41 M€/an**	**0.06 M€**

Creara, & THERMOS Project. (2021). Deliverable 3.9: THERMOS case studies (Version 2.0). Horizon 2020 THERMOS Project. https://www.thermos-project.eu/fileadmin/user_upload/case_studies/210331_THS_D3.9_CREARA_THERMOS_Case_Studies_V2_FINAL-komprimiert.pdf

5.2. Réseau de chaleur et de froid de BARCELONE (Espagne)

Faits clés et localisation

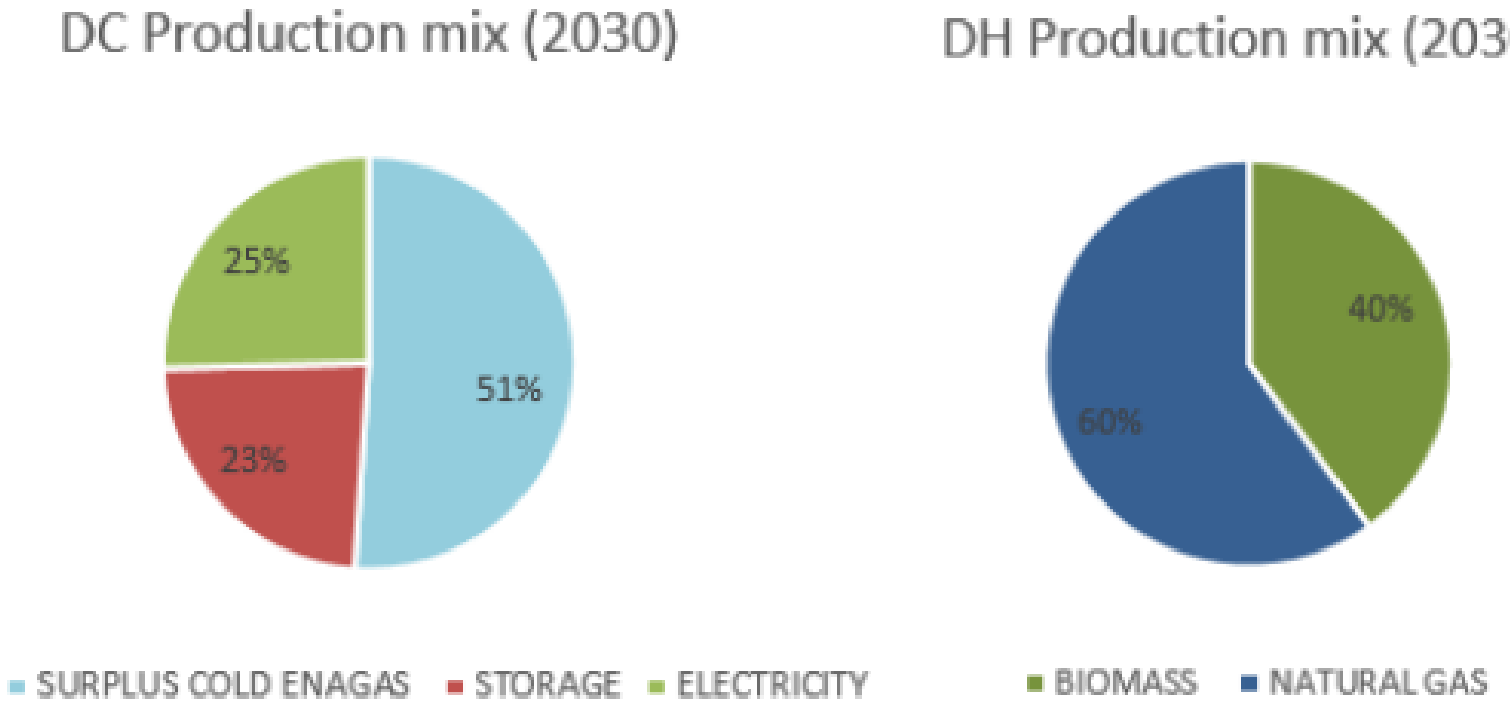
Part de marché de la Forêt Profonde	N.a.
Capacité de chauffage et de climatisation	DH: 23 MW (Cible: 40 MW) DC: 14 MW (Cible: 70 MW + 36 MW Stockage de glace)
Production de chaud et de froid	DH: 12 GWh/an (Cible: 59 GWh/an) DC: 7.6 GWh/a (Cible: 54 GWh)
Réseau km (double tuyau)	12 km (target: 36 km)
émissions CO_2	DH: 94.9 kg/MWh DC: 0 kg/MWh (émissions nettes, compensées par la production d'électricité de CHP)



Ecoenergies. (n.d.). Red de calor y frío en Barcelona y L'Hospitalet de Llobregat. https://www.ecoenergies.cat/es

5.2. Réseau de chaleur et de froid de BARCELONE (Espagne)

Les projets du DHCN cherchent à améliorer les ressources disponibles pour fournir de l'énergie ; de cette manière, le mix énergétique est réduit, donc les émissions sont réduites, tout en restant une dépendance aux technologies fossiles ; l'objectif à long terme est de réduire ou d'éliminer cette dépendance en augmentant la proportion d'énergies renouvelables.



Sources d'énergies utilisées pour DH et DC dans Ecoenergies Barcelona 2014

Ecoenergies. (n.d.). Red de calor y frío en Barcelona y L'Hospitalet de Llobregat. https://www.ecoenergies.cat/es

5.2. Réseau de chaleur et de froid de BARCELONE (Espagne)

Demande et offre d'énergie – Barcelone (Résumé)

Climat et demande

climat subtropical-méditerranéen ; ~1150 HDD (hivers doux).

Faible chauffage, demande de refroidissement élevée et croissante.

Mix énergétique actuel

Chauffage : Principalement du gaz naturel (systèmes individuels).

Refroidissement : principalement à base d'électricité.

Ordonnance solaire thermique (1999) : Obligation de transport solaire et de protection solaire (DHW) dans les bâtiments neufs ou rénovés.

Consommation d'énergie

Bâtiments existants : ~80 kWh/m²·an

Nouveaux bâtiments : ~45 kWh/m²·an

Structure du marché

Marché de l'énergie libéralisé (les consommateurs choisissent leurs fournisseurs).

5 à 6 fournisseurs couvrent ~90 % de l'offre totale → concentration modérée.

Chauffage et refroidissement urbains (DHC)

Régulé par la mairie de Barcelone via TERSA (société publique).

Les prix doivent rester compétitifs par rapport à l'énergie conventionnelle.

Tarification

Chauffage urbain : 42 €/MWh, ~10 % moins cher que le gaz naturel.

Refroidissement de district : 38 €/MWh, 5 à 12 % de moins que l'électricité.

Clients industriels : tarification personnalisée (modèle B2B).

Étude de cas – Mercabarna (Ecoenergies)

Remplacement de l'électricité de 32 GWh/an par un refroidissement de district.

Économies :

20 % de réduction des coûts d'électricité.

8 730 émissions de tCO_2 évitées par an.

Ecoenergies. (n.d.). Red de calor y frío en Barcelona y L'Hospitalet de Llobregat. https://www.ecoenergies.cat/es

5.3. RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE FROIDE DCN ISSUE DE LA VAPORISATION DE GAZ NATUREL LIQUÉFIÉ

Contexte

Les bâtiments consomment ~40 % de l'énergie mondiale ; La demande de refroidissement augmente.

Demande mondiale de refroidissement résidentiel : 300 TWh (2000) → 4000 TWh (2050) → 10 000 TWh (2100).

La demande de refroidissement est plus difficile à prévoir que celle du chauffage, étant affectée par le rayonnement solaire, les gains internes et les îlots de chaleur urbains.

Systèmes de refroidissement de district (DCS)

Solution de refroidissement centralisée pour plusieurs bâtiments.

Composants : unité de production, réseau de distribution, clients, système de rejet de chaleur.

Reconnu comme la meilleure technologie disponible (BAT) dans l'UE.

Déchets d'énergie froide provenant du GNL

La regazéification du GNL libère une énergie froide significative (~1245 MWh/an en Italie à partir des centrales L–CNG).

Potentiel de refroidissement gratuit, réduisant la demande d'électricité dans la climatisation.

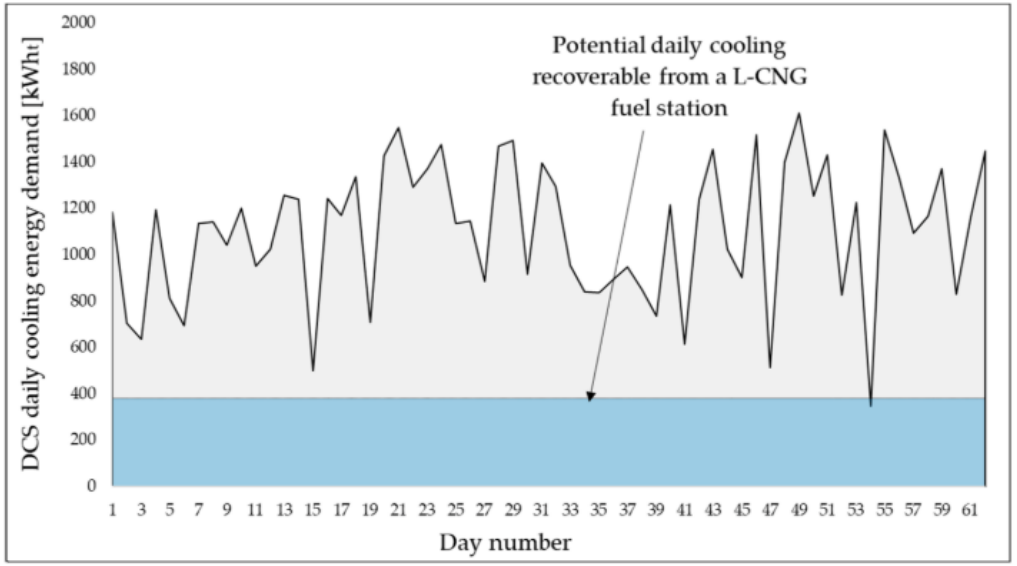
Aucune étude antérieure sur le couplage des DCS avec la récupération de l'énergie froide L–CNG.

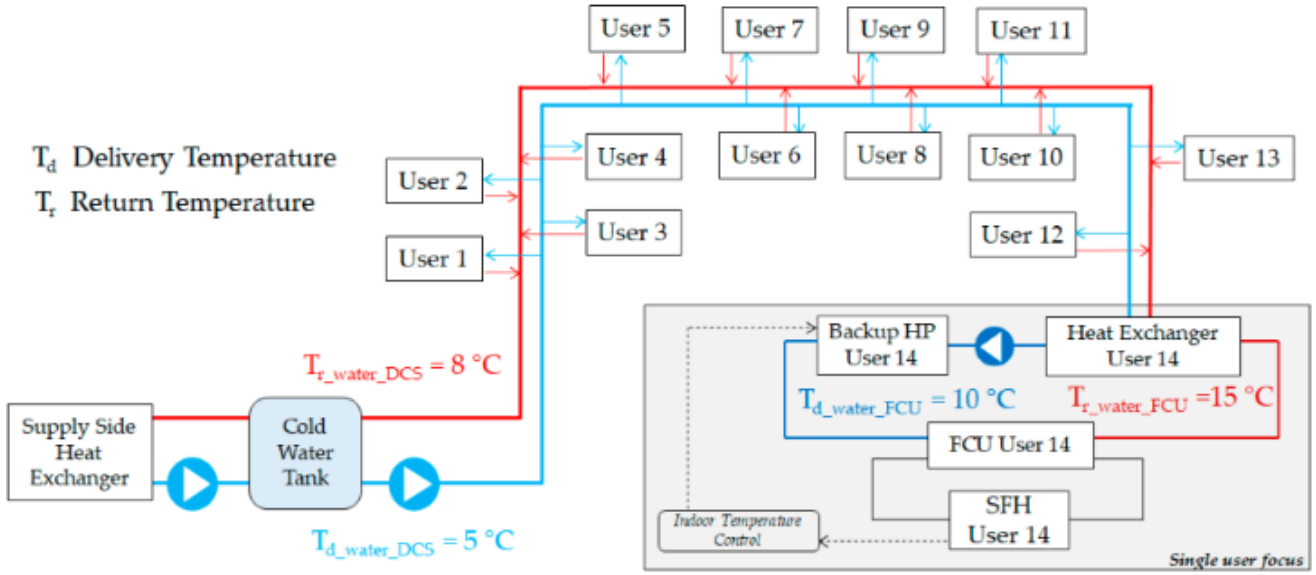
Mugnini, A., Coccia, G., Polonara, F., & Arteconi, A. (2019). Potential of District Cooling Systems: A Case Study on Recovering Cold Energy from Liquefied Natural Gas Vaporization. Energies, 12(15), 3027. https://doi.org/10.3390/en12153027

5.3. RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE FROIDE DCN ISSUE DE LA VAPORISATION DE GAZ NATUREL LIQUÉFIÉ

Étude de cas
Potentiel d'énergie froide
Consommation annuelle de GNL dans les stations L–CNG : 5400 t/an
Énergie froide gaspillée lors de la regazéification : 830 kJ/kg GNL
Énergie froide récupérable :
~380 kWht/jour (si on fonctionne 365 jours/an)
~550 kWht/jour (si on exclut les week-ends, 253 jours/an)

Profils de puissance de refroidissement
P1 : Apport constant (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.





Mugnini, A., Coccia, G., Polonara, F., & Arteconi, A. (2019). Potential of District Cooling Systems: A Case Study on Recovering Cold Energy from Liquefied Natural Gas Vaporization. Energies, 12(15), 3027. https://doi.org/10.3390/en12153027

5.3. RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE FROIDE DCN ISSUE DE LA VAPORISATION DE GAZ NATUREL LIQUÉFIÉ

Résultats de la simulation

Cas de référence

Systèmes de refroidissement séparés : Unités à ventilateur alimentées par une pompe à chaleur

Demande de refroidissement (juillet–août) : 47 MWht

Consommation électrique : 17 MWhe

Analyse de la puissance de refroidissement libre

DCS 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 d'un réservoir de 60 m³ :

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

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

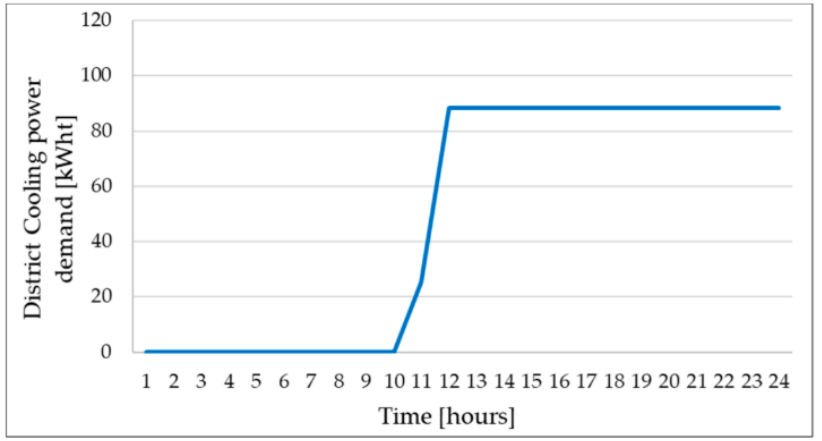
Permet un meilleur équilibre entre l'offre et la demande

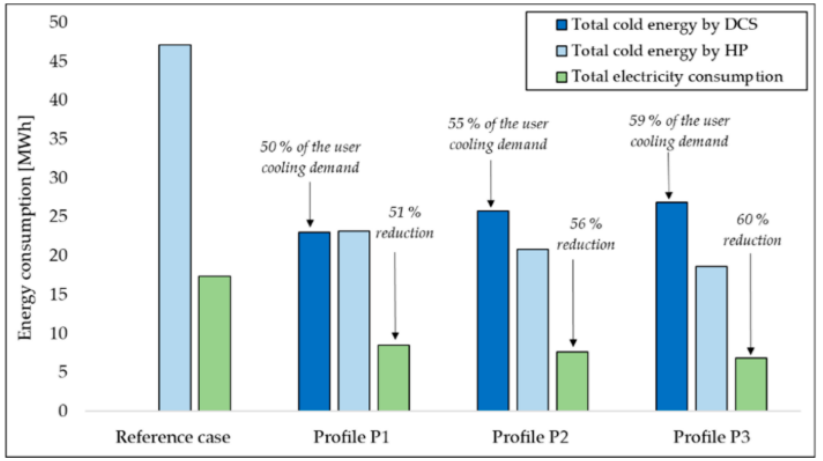
Considérations de taille TES

Plage optimale : 30–90 m³

Réservoirs plus petits : inertie thermique insuffisante

Réservoirs plus grands : pertes de chaleur accrues et réponse du système plus lente





Mugnini, A., Coccia, G., Polonara, F., & Arteconi, A. (2019). Potential of District Cooling Systems: A Case Study on Recovering Cold Energy from Liquefied Natural Gas Vaporization. Energies, 12(15), 3027. https://doi.org/10.3390/en12153027

5.3. RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE FROIDE DCN ISSUE DE LA VAPORISATION DE GAZ NATUREL LIQUÉFIÉ

Conclusions

Avantages DCS :
Approvisionnement en énergie froide à faible coût avec des émissions de CO_2 réduites
Intégration avec les énergies renouvelables, la trigénération et le stockage thermique
Récupération efficace de l'énergie froide résiduelle (ex, stations de ravitaillement L–CNG)
Étude de cas :
Système : Station de ravitaillement L–GNC fournissant un refroidissement à un quartier résidentiel
Meilleure performance : 60 % d'économies d'électricité (profil P3 + 60 m³ TES)
Économies générales : réduction de l'électricité de > 50 % dans tous les scénarios
Considérations et travaux futurs :
Les résultats dépendent des hypothèses concernant la disponibilité énergétique des vaporisateurs de GNL
Des études complémentaires sont nécessaires sur la taille des DCS et l'optimisation des connexions utilisateur
Conclusions principales :
La vaporisation du GNL peut efficacement alimenter les DCS résidentiels
L'intégration des transports et du refroidissement résidentiel favorise la durabilité urbaine

Mugnini, A., Coccia, G., Polonara, F., & Arteconi, A. (2019). Potential of District Cooling Systems: A Case Study on Recovering Cold Energy from Liquefied Natural Gas Vaporization. Energies, 12(15), 3027. https://doi.org/10.3390/en12153027

5.4. CONCLUSIONS

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 DHC
Soutien financier direct/indirect	Les projets DHC bénéficient de subventions directes/indirectes existantes
Politique locale axée sur la cohérence avec l'urbanisme	Les autorités locales promeuvent le DHC 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 DHC 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

Merci!

Module 4 – Réseaux de froid
SHaKE – Sharing Heat and Knowledge on Energy Communities

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

Developé par UJI
Dr. Adrián Mota-Babiloni | mota@uji.es
Ghad Alarnaot-Alarnaout | alarnaot@uji.es

Co-funded by
the European Union

