

AMORCE

ADEME

**Note sur les réseaux de froid
et la production de froid
à partir de réseaux de chaleur**

Avril 2008

SOMMAIRE

1.	Préambule.....	3
2.	Technologies pour la production et la distribution de froid en réseau.....	3
2.1	Réseaux de froid ou réseau de chaleur avec production de froid.....	3
2.1.1	Production de froid centralisée.....	4
2.1.2	Production de froid à partir d'un réseau de chaleur.....	4
2.2	Les technologies de production de froid.....	6
2.2.1	Machines à compression.....	6
2.2.2	Machines à absorption.....	7
3.	Comparaison économique et environnementale.....	10
3.1	Coûts de production de froid.....	10
3.2	Impact en énergie primaire.....	11
3.3	Impact en émissions de CO ₂	13
4.	Exemples de réseaux de froid ou de production de froid sur réseaux de chaleur.....	15
4.1	MONTPELLIER (SERM).....	15
4.2	Production de froid à partir de chaleur.....	18
5.	Perspectives de développement.....	19

1. Préambule

Alors que les réseaux de chaleur sont aujourd'hui bien identifiés comme l'un des principaux vecteurs de développement des énergies renouvelables, la production et/ou la distribution de froid en réseaux collectifs est encore très peu développée en France.

Par ailleurs, des moyens de production comme la récupération d'énergie sur usines d'incinération ou sur process industriel voire la géothermie profonde, représentent des disponibilités d'énergie en période estivale, a priori en coïncidence avec les besoins de climatisation (bien que certains besoins de froid sont présents y compris en hiver).

Les possibilités de développement d'une offre commerciale mixte chaleur/froid pourraient permettre d'améliorer la perception du chauffage ou du froid urbain, en particulier lors d'opérations d'aménagement intégrant des bâtiments tertiaires.

La présente note a pour objectif de dresser les possibilités techniques et enjeux de développement de la production et la distribution de froid en réseau. Elle s'appuie en particulier sur l'important travail en cours dans le cadre du projet SUMMERHEAT, piloté par l'association Rhônalpénergie Environnement pour sa partie française. Il associe notamment la Compagnie de Chauffage de Grenoble, intéressée par les possibilités de valorisation estivale de la chaleur issue de l'UIOM qui fournit déjà près de 30% des besoins thermiques du second réseau de chaleur français.

2. Technologies pour la production et la distribution de froid en réseau

2.1 Réseaux de froid ou réseau de chaleur avec production de froid

La mise en place d'une offre de fourniture de froid/climatisation sur un réseau urbain peut s'envisager selon deux principes :

- une production de froid centralisée alimentant un réseau dit « d'eau glacée » (entre 1 et 7°C au départ de la centrale), pouvant être développé indépendamment d'un réseau de chaleur,
- une production de froid en sous-station à partir de l'énergie fournie par un réseau de chaleur.

2.1.1 Production de froid centralisée

C'est essentiellement cette technologie qui est développée sur les réseaux de chaleur et de froid français. Le principe est celui d'une production de froid à partir de machines à compression et/ou absorption (cas des réseaux de Montpellier par exemple) et d'une distribution via des canalisations spécifiques vers les sous-stations des bâtiments raccordés. En sous-station, comme pour la chaleur, sont installés des échangeurs permettant de dissocier la distribution dite « primaire » du « secondaire » intérieur aux bâtiments.

Les réseaux de chaleur et de froid sont physiquement totalement distincts et indépendants.

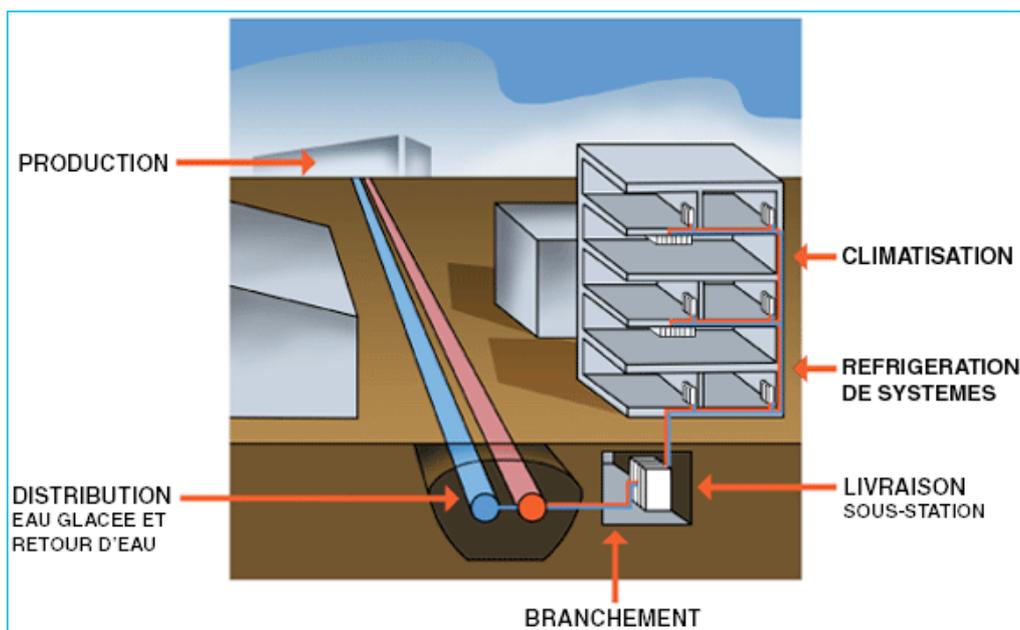


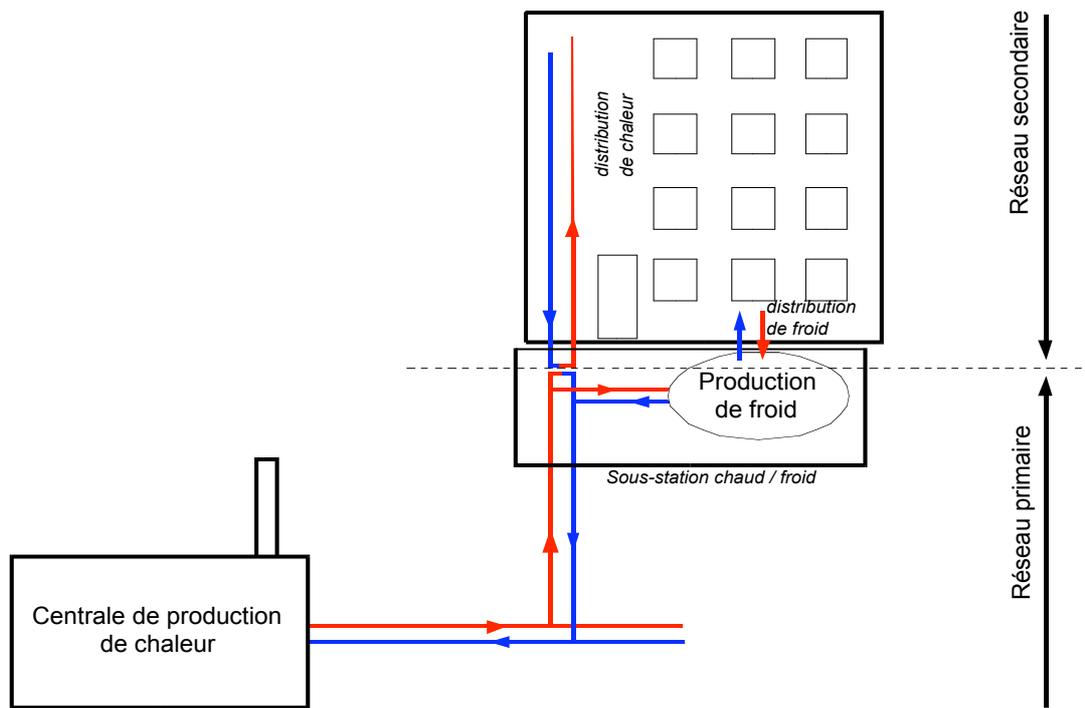
illustration Climespace

2.1.2 Production de froid à partir d'un réseau de chaleur

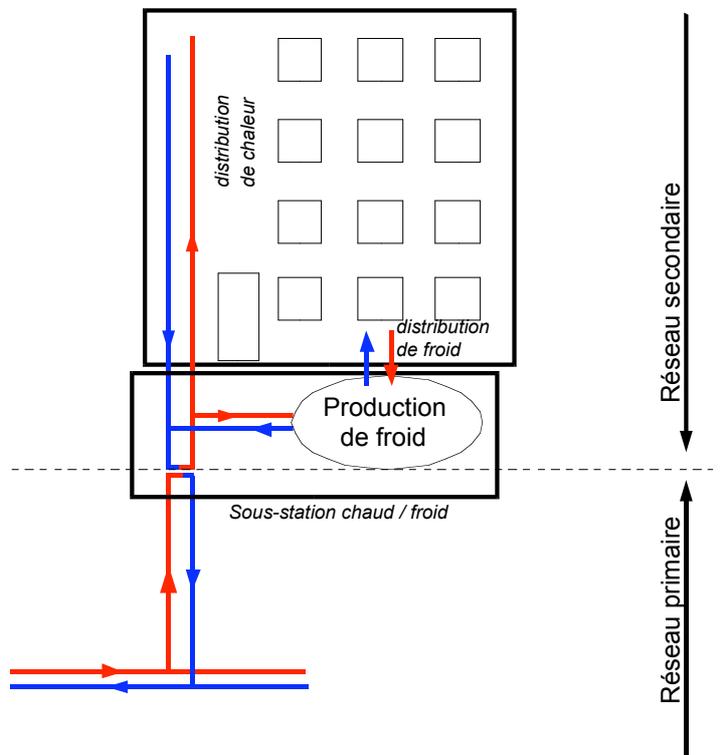
Cette logique est particulièrement intéressante pour le développement d'une offre commerciale de fourniture de froid par les réseaux de chaleur. Il s'agit d'utiliser des technologies d'absorption (ou d'adsorption) pour produire en sous-station, à partir d'eau chaude, d'eau surchauffée ou de vapeur, de l'eau glacée distribuée dans le ou les bâtiments en aval de la sous-station.

L'avantage principal est que les canalisations en place peuvent être utilisées et l'offre de froid faite sur la totalité du réseau de chaleur existant.

Le principe décrit dans le schéma ci-après est celui d'un réseau de chaleur qui intégrerait sur le réseau primaire une production de froid décentralisée (l'exploitation de la production de froid est alors du ressort du gestionnaire du réseau de chaleur).



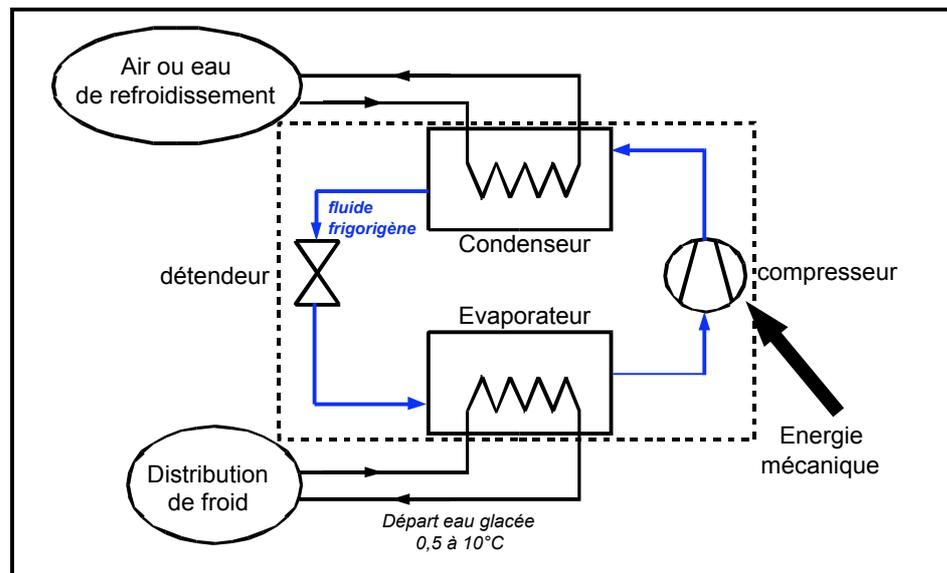
Un autre type de schéma pourrait consister, avec pratiquement les mêmes équipements, à placer la production de froid sur le secondaire, c'est à dire sous la responsabilité de l'utilisateur du réseau de chaleur (certains usagers pourront privilégier cette option). C'est le schéma ci-après.



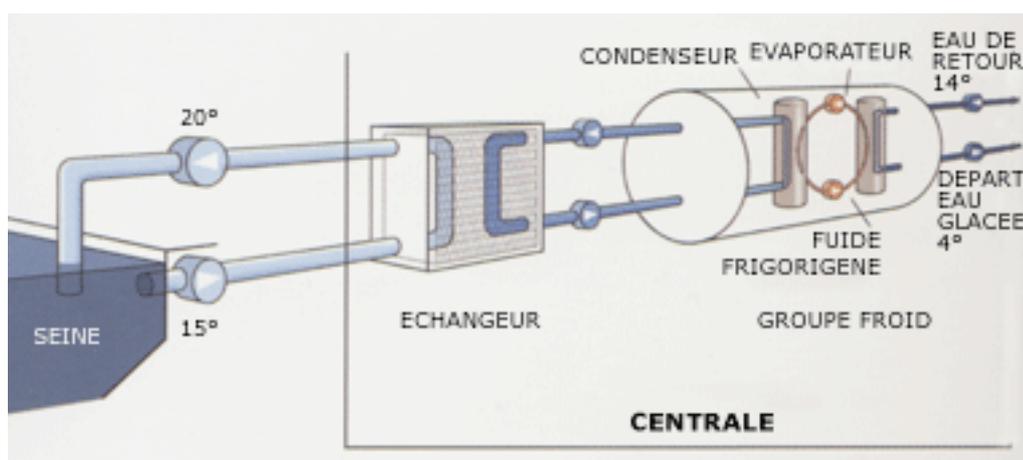
2.2 Les technologies de production de froid

2.2.1 Machines à compression

Le principal mode de production de froid à échelle industrielle est la machine à compression, qui fonctionne sur le cycle d'un fluide frigorigène.



La source froide nécessaire au niveau du condenseur peut être fournie par l'air (via une installation d'aérotherme) ou par une eau de nappe ou de rivière, ce qui permet de n'avoir aucun rejet « visible » à l'atmosphère.



Source : Climespace

L'efficacité énergétique d'une machine à compression (le COP_{froid}) est calculée par le rapport entre l'énergie « froid » récupérée au niveau de l'évaporateur et l'énergie mécanique (généra-

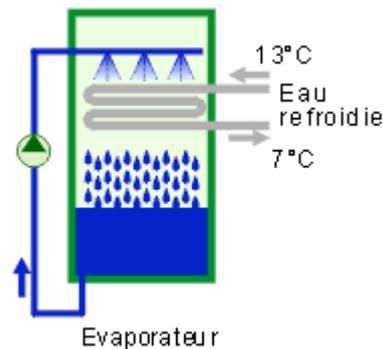
lement électrique) apportée au condenseur. Le COP_{froid} moyen est de l'ordre de 3 à 3,5 (3 à 3,5 kWh froid produits pour 1 kWh électrique consommé).

2.2.2 Machines à absorption

Le principe de fonctionnement des machines frigorifiques à absorption comprend également quatre composants principaux :

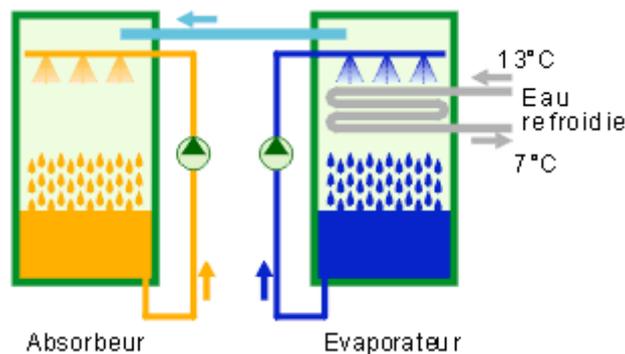
- l'évaporateur,
- l'absorbeur,
- le concentrateur
- le condenseur.

Dans l'**évaporateur**, de l'eau est utilisée comme réfrigérant et pulvérisée dans une ambiance à très faible pression. L'évaporateur est parcouru par un circuit à eau. En s'évaporant, le réfrigérant soustrait sa chaleur à cette eau qui est ainsi refroidie. **C'est cette eau qui alimente le circuit de climatisation du bâtiment qui y est raccordé.**



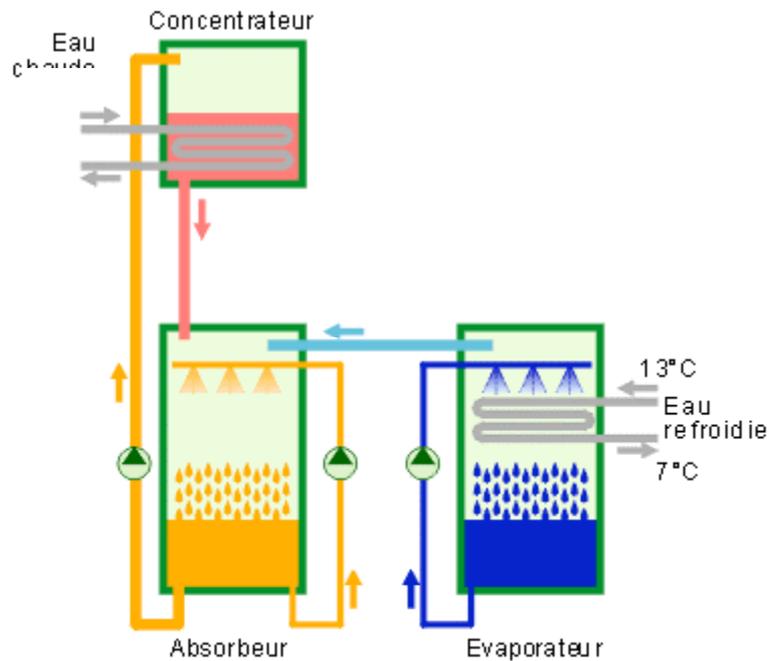
Source : CD Energie + / Energie Wallonie

La vapeur d'eau créée dans l'évaporateur est amenée à l'**absorbeur**. Il contient la solution absorbante (bromure de lithium) qui est continuellement pompée dans le fond du récipient pour y être pulvérisée. Le bromure de lithium absorbe la vapeur d'eau hors de l'évaporateur et y maintient ainsi la basse pression nécessaire à la vaporisation du réfrigérant.



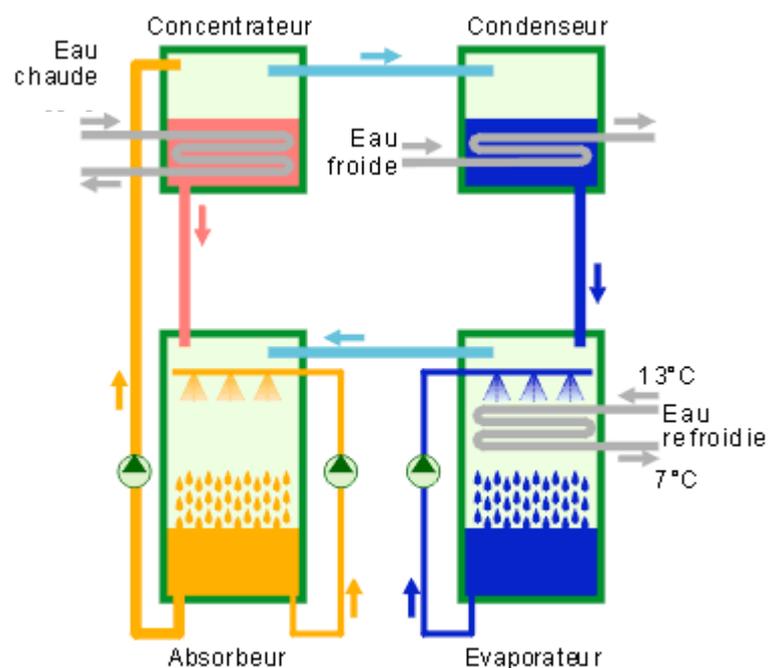
Au fur et à mesure qu'elle absorbe la vapeur d'eau, la solution absorbante est de plus en plus diluée.

La solution est régénérée dans le **concentrateur**. Elle est réchauffée, par une **batterie à eau chaude** (c'est là que se situe le **besoin de chaleur** qui peut être apporté par un **réseau de chaleur**) et une partie de l'eau s'évapore. La solution régénérée retourne à l'absorbeur.



Enfin, la vapeur d'eau extraite du concentrateur est injectée dans le **condenseur**, où elle est refroidie par une circulation d'eau froide. C'est là que se situe le besoin en eau froide qui peut être soit de l'eau de nappe, soit de l'eau refroidie dans une tour aéroréfrigérante.

L'eau condensée retourne à l'évaporateur.



L'efficacité énergétique (le COP_{froid}) est calculée par le rapport entre l'énergie « froid » récupérée au niveau de l'évaporateur et l'énergie thermique apportée au niveau du concentrateur. **Le**

COP_{froid} moyen est de l'ordre de 0,6 à 0,7 (0,6 à 0,7 kWh froid produits pour 1 kWh thermique consommé).

Par rapport au système à compression, un problème important est lié au besoin de refroidissement au niveau du condenseur. A niveau de production de froid égal, la machine à absorption a un besoin de refroidissement du condenseur 2 fois supérieur au besoin de refroidissement d'une machine à compression (rejet de chaleur de 2,5 kWh chaleur pour 1 kWh froid produit), avec une forte sensibilité à la température de l'eau de refroidissement. Les contraintes de température des machines à absorption ne permettent pas l'utilisation de technologies refroidissement de type *aéro-refroidissement* ou *dry cooler* par exemple, qui ont des coûts d'exploitation et des contraintes réglementaires moins lourds que les systèmes de refroidissement à air humide (par tour).

Si un refroidissement par nappe ou eau de rivière n'est pas envisageable, des systèmes de tours aérorefrigérantes humides doivent être retenues.

Les machines à absorption ont deux avantages pour les services de distribution d'énergie calorifique :

- elles permettent de mettre en place une offre de fourniture de froid à partir d'un réseau de chaleur existant, sans nécessité de mise en œuvre d'un réseau de distribution spécifique,
- elles permettent la valorisation d'énergie thermique excédentaire et/ou fatales : cas de la récupération sur process industriel ou sur usine d'incinération, où la chaleur produite en été est souvent peu ou pas valorisée ; cela peut également permettre d'optimiser une installation de cogénération (à partir de moteur ou de turbine à gaz), qui devient ainsi une trigénération.

3. Comparaison économique et environnementale

3.1 Coûts de production de froid

La comparaison des coûts de production de froid en fonction du mode de production retenu est basée sur l'enquête réalisée par le bureau d'études GIRUS dans le cadre du programme SUMMERHEAT dont Rhônalpénergie Environnement et la Compagnie de Chauffage de Grenoble sont les partenaires français.

Le principe est de comparer une production par machine à absorption ou par machine à compression dans plusieurs configurations :

- cas d'un petit ensemble de bureaux avec des productions individualisées par lot :
 - o 35 kW par machine à compression,
 - o 35 kW par machine à absorption alimentée par un réseau de chaleur,
- production en pied d'immeuble :
 - o 300 kW par machine à compression,
 - o 300 kW par machine à absorption alimentée par un réseau de chaleur,
- production centralisée avec création d'un réseau de froid :
 - o 1000 kW par machine à compression,
 - o 1000 kW par machine à absorption alimentée par un réseau de chaleur.

L'analyse proposée dans le cadre du programme SUMMERHEAT abouti aux coûts de production de froid suivants :

	Machine à compression	Machine à absorption alimentée par réseau de chaleur (fonction du prix de la chaleur ¹)		
		54 €HT/MWh	20 €HT/MWh	7 €HT/MWh
- 35 kW	167	352	304	285
- 300 kW	83	148	100	81
- 1 000 kW + réseau de froid	108	171	123	104

Coût de production du froid dans différentes configurations

¹ Le prix de la chaleur fournie par le réseau est considéré à trois niveaux :

- 54 €HT/MWh : prix moyen de vente de la chaleur par les réseaux de chaleur français, en 2006,
- 20 €HT/MWh : niveau de prix marginal de la chaleur (considéré en base dans l'étude Summerheat),
- 7 €HT/MWh : prix d'accès à la chaleur « gratuite » en été (UIOM, process industriel..).

Du point de vue du coût de production du froid, plusieurs points peuvent être soulignés :

- au prix moyen de vente de la chaleur par les réseaux de chaleur (54 €/MWh), la production de froid décentralisée à partir de chaleur (par absorption) est sensiblement plus coûteuse qu'une production par compression
- avec un prix de chaleur d'été de 7 €/HT/MWh, envisageable dans le cas d'une valorisation de chaleur fatale (process industriel ou UIOM), la production décentralisée par absorption est économiquement pertinente en sous-station de pied d'immeuble (300 kW_{froid}),
- les solutions avec création d'un réseau de froid ont une rentabilité économique liée (comme pour les réseaux de chaleur) à la densité du réseau (le rapport entre la puissance froid requise et la longueur de réseau) ; dans l'exemple considéré dans le programme Summerheat, la solution avec création de réseau de froid spécifique est plus coûteuse qu'une production en sous-station de 300 kW.

Dans l'hypothèse d'une production de froid à partir d'un réseau de chaleur, l'économie est pertinente dans le cas d'une valorisation de chaleur fatale, mais plus difficile à atteindre si des combustibles de compléments doivent être achetés pour finalement produire du froid. Avec un coût marginal de la chaleur de 20 €/MWh livré en sous-station (ce qui peut correspondre à un prix de combustible de l'ordre de 15 €/MWh_{PCI}), le coût de production de froid est supérieur d'environ 20% à une production par machine à compression.

3.2 Impact en énergie primaire

L'intérêt d'un mode de production d'énergie peut être rapporté à son impact en termes de recours aux énergies primaires.

Le projet européen Ecoheatcool et le projet de norme européenne EN 15316-4-5 ont développé un indicateur de la performance énergétique des systèmes de chauffage urbain, applicable également à la distribution urbaine de froid.

Cet indicateur permet d'évaluer les réseaux de chaleur et de froid quant à leur efficacité énergétique et leur recours à des énergies renouvelables.

Son mode de calcul couvre l'ensemble de la chaîne : production - transport - livraison.

Des facteurs de ressource primaires (PRF – *Primary resource factors*) sont définis par combustible ou par source d'énergie et peuvent être combinés pour évaluer les facteurs de ressource primaires de mix énergétiques complexes. Quelques-uns sont présentés dans le tableau ci-après :

Combustible / énergie	PRF
- électricité	2,5
- charbon	1,2
- gaz naturel, fioul...	1,1
- biomasse	0,1
- UIOM, géothermie...	0

Ce facteur doit être appliqué à la consommation d'énergie à l'entrée du système considéré (MWh_{PCI} pour les combustibles, MWh livré compteur pour l'électricité, MWh entrée-réseau pour les process industriels, les UIOM, la géothermie...) et rapporté à l'énergie utile (chaud ou froid) pour obtenir le « facteur d'énergie primaire » du système.

On abouti ainsi, pour les différents systèmes de production de froid, aux facteurs de ressources primaires suivants :

Mode de production de froid	PRF ¹
Machine à compression	0,86
Machine à absorption sur réseau de chaleur :	
- UIOM / process industriel / géothermie	# 0
- biomasse	0,18
- gaz naturel, fioul...	1,96
- charbon	2,15
- réseau 60% UIOM ou géothermie / 40% gaz naturel	0,65
- réseau 70% bois / 30% gaz naturel	0,71

Si des combustibles fossiles doivent être consommés pour produire la chaleur qui alimente la machine à absorption, le facteur de ressource primaire du système est dégradé par rapport à un système à compression.

¹ Pour le calcul des PRF, les hypothèses suivantes sont retenues :

- machines à compression : COP moyen de 3 (3 kWh froid produits par kWh électrique consommé),
- réseaux de chaleur et machines à absorption : rendements de réseaux de chaleur (production + distribution) de 80% et COP moyen de 0,7 sur les machines à absorption.

Si on considère l'offre de froid par absorption comme un moyen de raccorder le bâtiment considéré au réseau de chaleur, il y a lieu de comparer le PRF global chaleur + froid du réseau de chaleur avec la solution alternative. Pour un bâtiment dont les besoins annuels sont constitués par exemple de 3/4 de chaleur et 1/4 de froid, le PRF global est alors le suivant :

Mode de production d'énergie		PRF moyen
chaleur	froid	
Système décentralisé		
électrique performant (COP 3)		0,86
gaz naturel	machine à compression	1,185
Réseau de chaleur		
60% UIOM ou géothermie / 40% gaz naturel		0,574
70% bois / 30% gaz naturel		0,553

3.3 Impact en émissions de CO₂

De même que l'on peut observer l'impact des différents systèmes en termes de facteur de ressource primaire, on peut également faire une comparaison en termes d'émissions de CO₂.

Comme pour les PRF décrits au 3.2, les facteurs d'émission de CO₂ sont définis par combustible ou énergie primaire. On propose de répartir des niveaux d'émission de CO₂ utilisés dans le système d'affectation de quotas de CO₂ (repris dans l'élaboration des contenus CO₂ des réseaux de chaleur utilisés pour les diagnostics de performance énergétique) :

Combustible / énergie	facteur CO ₂ <i>kg_{CO2}/kWh_{pcl}</i>
- électricité	0,180
- charbon	0,343
- gaz naturel	0,206
- fioul	0,282
- EnR, UIOM...	0,000

On abouti, pour les différents systèmes de production de froid, aux valeurs suivantes :

Mode de production de froid		facteur ¹ CO ₂ <i>kg_{CO2}/kWh_{ref}</i>
Machine à compression		0,060
Machine à absorption sur réseau de chaleur :		
- UIOM / énergie renouvelable		# 0
- gaz naturel		0,368
- fioul lourd		0,504
- charbon		0,612
- réseau 60% EnR / 40% gaz naturel		0,147
- réseau 70% EnR / 30% gaz naturel		0,110

Du point de vue des émissions de CO₂, seule l'énergie frigorifique produite à partir d'énergies renouvelables ou de récupération est plus performante que le froid produit par compression.

Le facteur d'émission considéré pour l'électricité est cependant un point de débat au niveau européen. Son appréciation peut fortement infléchir les conclusions en termes de performance CO₂.

Comme indiqué au 3.2, l'offre de froid sur réseau de chaleur peut être globalisée en termes de chaud / froid car c'est une façon d'inciter au raccordement au réseau de chaleur.

Mode de production d'énergie		facteur CO ₂ <i>kg_{CO2}/kWh_u</i>
chaleur	froid	
Système décentralisé		
électrique performant (COP 3)		0,060
gaz naturel	machine à compression	0,208
Réseau de chaleur		
60% EnR / 40% gaz naturel		0,114
70% EnR / 30% gaz naturel		0,095

¹ Les mêmes hypothèses que pour le calcul des PRF sont retenues :

- machines à compression : COP moyen de 3 (3 kWh froid produits par kWh électrique consommé),
- réseaux de chaleur et machines à absorption : rendements de réseaux de chaleur (production + distribution) de 80% et COP moyen de 0,7 sur les machines à absorption.

4. Exemples de réseaux de froid ou de production de froid sur réseaux de chaleur

Il existe moins d'une dizaine de réseaux de froid en France :

- Paris (réseau CLIMESPACE),
- Lyon (réseau de froid du centre commercial de la Part-Dieu, intégré au périmètre de concession du réseau de Lyon-Villeurbanne),
- Grenoble (réseau de froid du centre commercial de Grand-Place, intégré au périmètre de concession du réseau de la Compagnie de Chauffage de Grenoble),
- La Défense (intégré au périmètre de concession délégué à Enertherm),
- Courbevoie / Puteaux (réseau SOCLIC),
- Montpellier (3 réseaux gérés par la SERM),
- ...

Il s'agit de systèmes de distribution d'eau glacée, à différents niveaux de températures, avec donc des réseaux de distribution spécifiques distincts des réseaux de chaleur.

Le seul cas répertorié de production de froid à partir d'un réseau de chaleur est, en France, celui du réseau de chaleur de Corté.

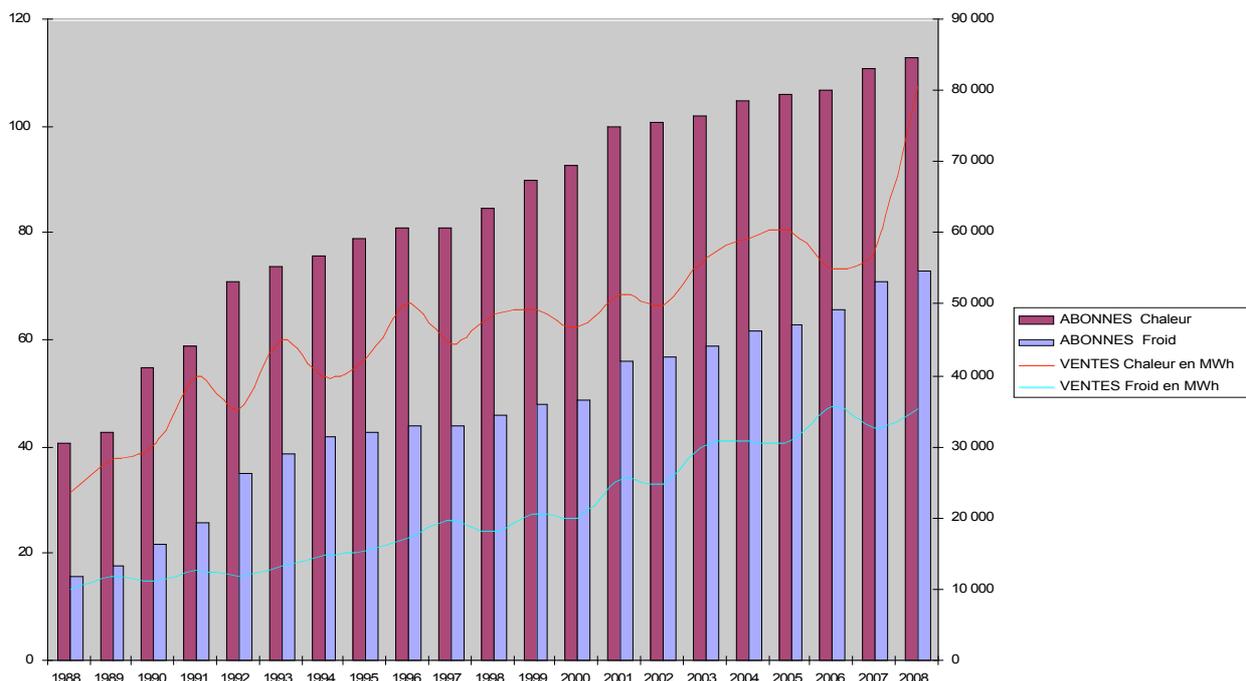
4.1 MONTPELLIER (SERM)

Plusieurs réseaux de distribution d'énergie calorifique sont en place sur l'agglomération montpelliéraine. Ils sont gérés par la SERM, SEM d'aménagement qui a développé une activité de gestion des réseaux de chaleur et qui est délégataire de la Ville de Montpellier sur ses réseaux de chaleur.

Trois réseaux de chaleur et de froid sont développés, le principal (Antigone / Polygone) desservant 250 000 m² de bureau, 7 000 équivalent logement ainsi que de nombreux éléments du patrimoine bâti de la ville.

L'offre de froid est très importante pour le développement du réseau de chaleur et de froid. Le nombre d'utilisateurs froid représente aujourd'hui 60% du nombre d'utilisateurs chaleur. Depuis 1990, le nombre d'utilisateurs froid a été multiplié par 3,5 pendant que le nombre d'utilisateurs chaleur était doublé.

Evolution du nombre d'abonnés et des ventes d'énergies

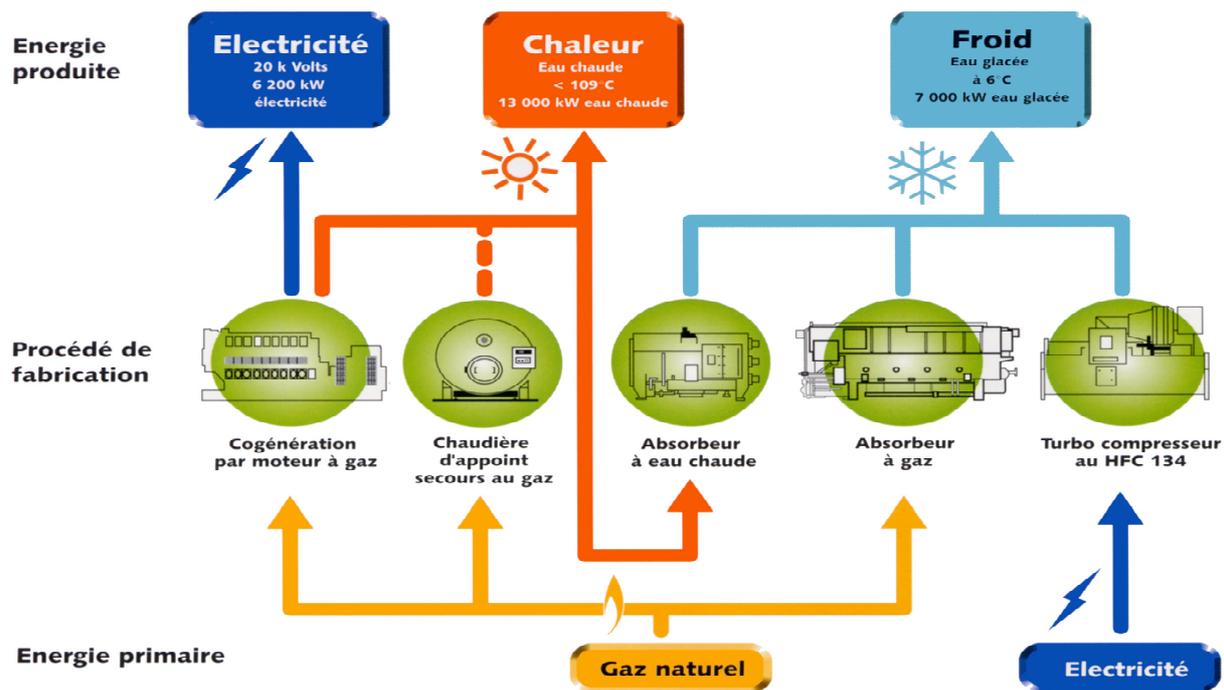


La principale centrale de production est celle du Polygone, qui est une centrale de trigénération. Cette trigénération mise en service en décembre 2000 dans le cadre de la rénovation de la chaufferie est intégrée à l'Hôtel de Ville. Le de Montpellier.

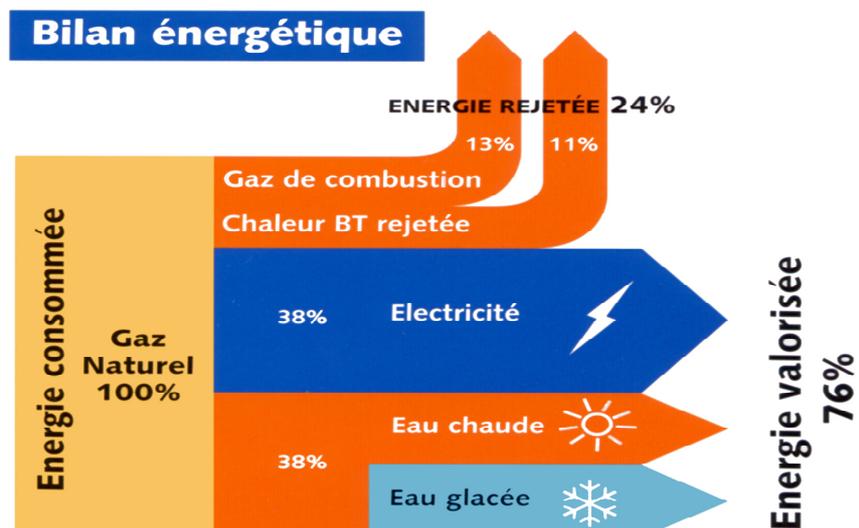
Cette installation regroupe deux types de machines à absorption, l'une alimentée par la chaleur et l'autre directement sur gaz. intégrant deux types de machines à absorption :

- l'une alimentée par de l'eau chaude issue de la partie « production de chaleur et d'électricité », à savoir de la cogénération par moteurs à gaz et des chaudières gaz d'appoint-secours,
- l'autre spécifique à la production de froid, alimentée directement par du gaz naturel.

Le coût de l'opération a été de 6,45 millions d'euros (l'ADEME a à l'époque accordé 70 000 € de subvention équivalent à 20% du surcoût lié à la production de froid par absorption).



Grâce à cette installation, le bilan énergétique global est particulièrement intéressant puisque plus de 75% de l'énergie consommée est valorisée sous une forme ou une autre. A peine 10% de l'énergie produite est dissipée faute de valorisation possible.



4.2 Production de froid à partir de chaleur

Le seul exemple identifié de production de froid à partir d'un réseau de chaleur est celui de l'IUT de Corté. Le réseau de chaleur de Corté est un cas très particulier : il s'agit d'un réseau de chaleur alimenté majoritairement (95% de taux de couverture) par une chaufferie bois de 5 MW, développé au milieu des années 1980 à partir d'un ensemble de bâtiments de l'université de Corse.

Le réseau a aujourd'hui une longueur de 5 km et est exploité par SEM Corse Bois-énergie, dans laquelle l'entreprise COFATHEC est désormais actionnaire.

L'un des usagers du réseau de chaleur, l'IUT de Corté, est équipé de deux machines à absorption de puissances frigorifiques de 105 et 210 kW. La production d'eau froide à 7 °C permet la climatisation des bâtiments d'enseignement.

Alimentée à partir du réseau à 88 °C, la puissance de réjection de l'absorption atteint plus de 500 kW et a nécessité la mise en place d'une tour de refroidissement.

Cet exemple est donc aujourd'hui totalement atypique, mais l'intérêt du développement d'une offre de froid associée au réseau de chaleur (encore une fois sans création de réseau de distribution spécifique), en particulier pour les réseaux disposant d'une énergie « fatale » l'été, interpelle de nouveaux opérateurs.

La CCIAG (Compagnie de Chauffage de Grenoble) est associée au projet européen Summerheat piloté, pour la France, par Rhônalénergie Environnement. Un quart des 1 000 GWh de chaleur actuellement vendus par le réseau de chaleur de Grenoble (le deuxième réseau français) est fourni par la récupération d'énergie sur une usine d'incinération.

L'été, la chaleur d'UIOM non valorisée représente de l'ordre de 10 000 MWh par mois. L'enjeu du développement d'une offre de froid permettant la valorisation de cette ressource est donc particulièrement important (outre d'intérêt « commercial » de cette offre). La CCIAG envisage la mise en place prochaine d'installations pilotes de production de froid par machines à absorption installées dans les sous-stations du chauffage urbain, qui seraient alimentées en eau chaude basse pression (90 °C). Le refroidissement est prévu sur l'eau de rivière ou sur nappe, en tous cas pour les premières installations.

5. Perspectives de développement

Indépendamment du développement des réseaux de froid, la production de froid à partir de réseaux de chaleur trouve une justification économique et environnementale dans la mesure où l'énergie utilisée est « fatale » (donc a priori de faible coût de mobilisation et neutre en termes de CO₂).

Son intérêt doit cependant également s'envisager en tant qu'offre commerciale permettant le développement d'un réseau de chaleur : c'est parce qu'une offre de froid sera associée au réseau de chaleur que certaines extensions seront possibles. L'alternative sera alors celle d'un raccordement au réseau de chaleur pour la fourniture des besoins de chauffage et de climatisation ou le développement de moyens de production de chaleur et de froid spécifiques.

Que ce soit en termes économiques ou en termes environnementaux (facteur d'énergie primaire ou facteur d'émissions de CO₂), la production de froid à partir de chaleur fatale s'envisage dans un ensemble chaleur/froid plutôt que comme des systèmes séparés.

Les développements et les mises au point qui pourront être conduits comme sur le réseau de chaleur de Grenoble devront être suivis avec attention pour permettre l'évaluation des potentiels réels en France.