



## ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE DE DIFFERENTS SYSTEMES DE PRODUCTION DE FROID



**GIRUS – Bureau d'Etudes**

1, rue Francis Carco

69 120 Vaulx en Velin

Tél : 04.37.45.29.29. – Fax : 04.37.45.29.30.

Affaire N°: **A7981**

Edition de : **Juillet 2007 – Ind A**

*The sole responsibility for the content of this [webpage, publication etc.] lies with the authors. It does not represent the opinion of the European Communities. The European Commission is not responsible for any use that may be made of the information contained therein.*

*Le contenu de cette [page web, publication, etc] n'engage que la responsabilité de son auteur et ne représente pas l'opinion de la Communauté européenne. La Commission européenne n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qui y figurent.*

*Die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser [Webseite, Publikation usw.] liegt bei den AutorInnen. Sie gibt nicht die Meinung der Europäischen Gemeinschaften wieder. Die Europäische Kommission übernimmt keine Verantwortung für jegliche Verwendung der darin enthaltenen Informationen.*

Présentation du projet :

**Summerheat / « Chaleur d'été »**

**Faire du froid avec de la chaleur non valorisée en été**

Le développement d'un service d'efficacité énergétique dans l'Union européenne est une nécessité pour réduire notre grande dépendance vis-à-vis des importations d'énergie et de l'augmentation des prix des énergies fossiles et pour tenir nos engagements pris pour protéger le climat. Par conséquent, le développement futur de technologies efficaces telles que la cogénération et la chaleur par les énergies renouvelables est un élément substantiel de la stratégie énergétique européenne.

Le principal obstacle à accroître l'utilisation de technologies qui nécessitent un gros investissement financier comme la cogénération et les incinérateurs (déchets, énergies renouvelables) dans les réseaux de chaleur est la faible charge du système pendant les mois d'été. En été, la majeure partie de la chaleur fatale produite par les cogénérations et les incinérateurs dans les réseaux de chaleur peut être utilisée comme source de chaleur pour la production de froid pour la climatisation (= chaleur d'été).

La généralisation de l'utilisation de la chaleur d'été améliorera la rentabilité de l'ensemble des centrales d'un réseau de chauffage en général et, en particulier, les installations de cogénération et les incinérateurs. De plus, la meilleure valorisation de la chaleur d'été sera plus efficace que les systèmes de refroidissement standard et participera à la réduction des gaz à effet de serre en Europe.

Dans le cadre de ce projet, des stratégies pour généraliser la chaleur d'été seront développées pour les régions concernées. Des propositions pour l'amélioration des conditions cadres seront élaborées et adressées aux décideurs. Un guide pour montrer d'une manière succincte les avantages de la « chaleur d'été » sera produit à destination des propriétaires de biens et aux bureaux d'étude.

Ce travail sera basé sur une analyse de marché approfondie des technologies d'approvisionnement et de la demande. Des études de faisabilité seront réalisées dans toutes les régions concernées pour démontrer les avantages potentiels de la « chaleur d'été » aux propriétaires de biens intéressés.

Le développement ciblé d'un cadre général plus positif, la diffusion de l'information et d'autres actions de support pour développer le marché de la « chaleur d'été » amélioreront la situation considérablement.

Donc, le consortium du projet a défini six cibles principales que la « chaleur d'été » devrait atteindre :

- Avoir une vue d'ensemble de la situation de la chaleur d'été en Europe et tout spécialement dans les pays participants.
- Spécifier les conditions générales dans les pays partenaires et mettre en évidence les barrières.
- Identifier les stratégies de mise en œuvre et de développement nécessaires pour accroître l'utilisation de cette technologie durable.
- Eliminer les barrières par des actions ciblées en s'adressant aux acteurs clefs au niveau national et international (conseils pour développer une stratégie politique).
- Etablir une coopération étroite avec les acteurs clefs tels que les investisseurs, les municipalités et les gestionnaires des réseaux de chaleur.
- Etablir une stratégie de diffusion au niveau national et international pour encourager le développement de projets partout en Europe.

Les partenaires du projet sont les suivants :

- Agence de l'énergie de Berlin, Allemagne, coordinateur
- Agence nationale de l'énergie de l'Autriche
- Gestionnaire du réseau de chaleur de Vienne, Autriche
- Bureau d'études Cityplan, République tchèque
- Rhônealpennergie-Environnement, France
- Bureau d'étude Energy Consulting Network, Danemark
- Gestionnaire du réseau de chaleur de Copenhague, Danemark
- Agence nationale de l'efficacité énergétique, Pologne
- Euroheat & Power, association européenne pour les réseaux de chaleur et la cogénération, Belgique

Partenaires associés :

- Vattenfall Europe (réseaux de chaleur de Berlin et Hambourg), Allemagne
- Gestionnaire du réseau de chaleur de Szczecin, Pologne
- Compagnie de Chauffage de Grenoble, France

En France, l'accent sera mis sur le réseau de chaleur de Grenoble avec la Compagnie de Chauffage de Grenoble comme partenaire. D'autres acteurs intéressés et motivés (société d'exploitation d'un réseau de chaleur, collectivités ou BET) peuvent être associés ponctuellement au travail et à la diffusion des résultats du projet.

## SOMMAIRE

---

<b>1. PREAMBULE – OBJET DE LA MISSION.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1. CONTEXTE, OBJECTIFS ET CONTENU DE L'ETUDE .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2. DESCRIPTIONS DES DIFFERENTS SCENARIOS .....</b>	<b>7</b>
1.2.1. <i>Refroidisseur de liquide à compression .....</i>	7
1.2.2. <i>Refroidisseur de liquide à absorption.....</i>	10
1.2.3. <i>Tour de refroidissement.....</i>	11
<b>2. ETUDE ECONOMIQUE.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. CHIFFRAGE DES INVESTISSEMENTS .....</b>	<b>14</b>
2.1.1. <i>Investissement pour le scénario décentralisé 35kW.....</i>	15
2.1.2. <i>Investissement pour le scénario décentralisé 100kW.....</i>	16
2.1.3. <i>Investissement pour le scénario décentralisé 300kW.....</i>	17
2.1.4. <i>Investissement pour le scénario décentralisé 1000kW.....</i>	19
<b>2.2. HYPOTHESES DE CALCUL POUR L'ETABLISSEMENT DES BILANS DE FONCTIONNEMENT .....</b>	<b>21</b>
2.2.1. <i>Charges d'énergies et de fluides.....</i>	21
2.2.2. <i>Charges d'exploitation et de gros entretien.....</i>	24
2.2.3. <i>Charges financières liées à l'amortissement des installations.....</i>	25
<b>2.3. BILANS DE FONCTIONNEMENT .....</b>	<b>26</b>
2.3.1. <i>Bilan de fonctionnement de base.....</i>	26
2.3.2. <i>Autres bilans de fonctionnement possible.....</i>	35
<b>3. CONCLUSION .....</b>	<b>40</b>

# 1. Préambule – Objet de la mission

## 1.1. CONTEXTE, OBJECTIFS ET CONTENU DE L'ETUDE

Rhonalpénergie-Environnement est engagé dans le projet SUMMERHEAT, dont un des objectifs est d'étudier la valorisation de la chaleur non-valorisée produite en période estivale par des installations d'incinération ou par des cycles combinée électricité-chaleur.

Dans le cadre de ce projet, le maître d'ouvrage souhaite approfondir la comparaison entre des systèmes classiques basés sur l'utilisation de groupes frigorifiques à compression, et des systèmes moins répandus, mais qui permettent en théorie une valorisation de la chaleur non-valorisée, basés sur l'emploi de machine à absorption.

Cette approfondissement concerne essentiellement les aspects suivants :

- Le coût d'investissement
- Le bilan de fonctionnement (quantité d'énergie :chaleur, électricité, eau, ...)

## 1.2. DESCRIPTIONS DES DIFFERENTS SCENARIOS

Plusieurs systèmes de production de froid sont prévus au cahier des charges :

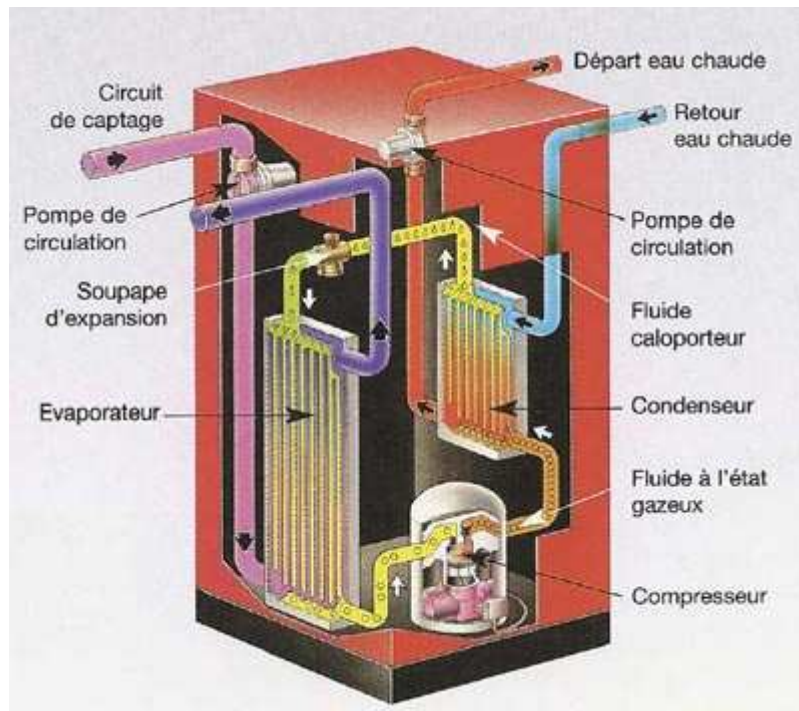
- Systèmes de production de froid décentralisés par compression (pour chaque bâtiment) – puissances étudiées : 35kW ; 100kW ; 300kW ; 1 MW
- Systèmes de production de froid décentralisés par absorption (pour chaque bâtiment) – puissances étudiées : 35kW ; 100kW ; 300kW ; 1 MW
- Systèmes de production de froid centralisés par compression et distribution par réseau de froid – puissances étudiées : 300kW ; 1 MW
- Systèmes de production de froid centralisés par absorption et distribution par réseau de froid – puissances étudiées : 300kW ; 1 MW

### 1.2.1. *Refroidisseur de liquide à compression*

#### a) Principe de fonctionnement

Les refroidisseurs de liquide à compression sont des machines thermodynamiques dithermes qui fonctionnent selon un cycle proche au cycle théorique de Carnot (pas de récupération d'énergie au détendeur, températures variables aux échangeurs, rendement isentropique). Ces machines permettent de transférer de l'énergie d'une source à faible température vers une source à haute température et utilisent pour cela une énergie mécanique.

Ces machines peuvent fournir à la fois de la chaleur et du froid. Elles sont composées d'un compresseur, d'un condenseur, d'un évaporateur et d'un détendeur et utilisent un fluide frigorigène. Le fluide frigorigène est comprimé par le compresseur pour être à haute température et haute pression, il passe ensuite dans le condenseur, dans le quel il est refroidi par la source à haute température, de la chaleur est récupérée, ensuite le fluide est détendu, sa pression et sa température chutent fortement, le fluide frigorigène passe à l'état liquide. Le passage par l'évaporateur permet son évaporation et la production de froid à la source froide.



*Figure 1 : fonctionnement d'une pompe à chaleur*

Dans le cas des refroidisseur de liquide, la condensation peut être assurée de deux manières différentes :

- par condenseurs à air
- par condenseur à eau



*Figure 2 : vue d'un refroidisseur de liquide à condensation à air*



Figure 3 : vue d'un refroidisseur de liquide à condensation à eau

Dans le cas des refroidisseurs de liquide à condensation à l'eau, cette eau doit à son tour être refroidie. Elle peut l'être par des tours aéro-réfrigérantes sèches ou humides ou encore par une nappe phréatique.

#### b) Capacité frigorifique et performances énergétiques

Ces deux technologies diffèrent également par leur plage de capacité frigorifique :

- De quelques dizaines de kW froid à 1 MW pour les machines à condensation par air
- De quelques centaines de kW froid à plusieurs MW froid pour les machines à condensation par eau

Le Coefficient de Performance ou Energy Efficiency Ratio est défini dans des conditions nominales spécifiques selon le type de machine :

- 35°C de température d'air pour les machines à condensation par air, le régime d'eau à l'évaporateur est de 12°C – 7°C,
- 30°C - 35°C de régime d'eau pour les machines à condensation par eau, le régime d'eau à l'évaporateur est de 12°C – 7°C, les consommations des condenseurs à air ne sont pas prises en compte.

Notons que les régimes de fonctionnement nominaux sont plus favorables pour les machines à condensation par eau, et conduisent à de meilleurs Energy Efficiency Ratio, d'autant que les consommations des auxiliaires de condensation ne sont pas comptées. Ils sont en majorité compris entre 2.5 et 3 (classe G <2.1 ; Classe A >3.1) pour des refroidisseurs de liquide à condensation par air, et entre 4 et 5 (classe G <3.05 ; Classe A >5.05) pour des refroidisseurs de liquide à condensation par eau, aux conditions nominales. La prise en compte des auxiliaires de condensation tend à réduire l'écart de performance énergétique.

Le coefficient de performance saisonnier (ou le Seasonal Energy Efficiency Ratio) des refroidisseurs de liquide à condensation par air tend à être meilleur que le coefficient de

performance nominale. En effet, les conditions usuelles de fonctionnement sont plus favorables ; température de condensation plus faibles. De récents travaux de normalisation ont défini un Européen Seasonal Energy Efficiency Ratio (ESEER) visant à donner une image fidèle de la performance énergétique moyenne. Les ESEER des refroidisseurs de liquide à condensation par air sont de l'ordre de 3.

Le coefficient de performance saisonnier (ou le Seasonal Energy Efficiency Ratio) des refroidisseurs de liquide à condensation par eau dépend de la technologie utilisée pour le refroidissement du condenseur. En première approximation, un refroidisseur de liquide dont le condenseur à eau refroidi par une tour aéro-réfrigérante sèche a un coefficient de performance saisonnier du même ordre de grandeur que celui d'un refroidisseur de liquide à condensation par air. L'utilisation d'une tour aéro-réfrigérante humide permet d'améliorer le coefficient saisonnier malgré l'utilisation d'auxiliaires complémentaires, Le ESEER est de l'ordre de 3.5. L'incidence de l'utilisation d'une nappe phréatique est relativement difficile à évaluer a priori, la performance énergétique de ce système dépend de la température de la nappe et des consommations des auxiliaires (profondeur de la nappe, présence d'échangeur intermédiaire).

#### c) Mise en oeuvre

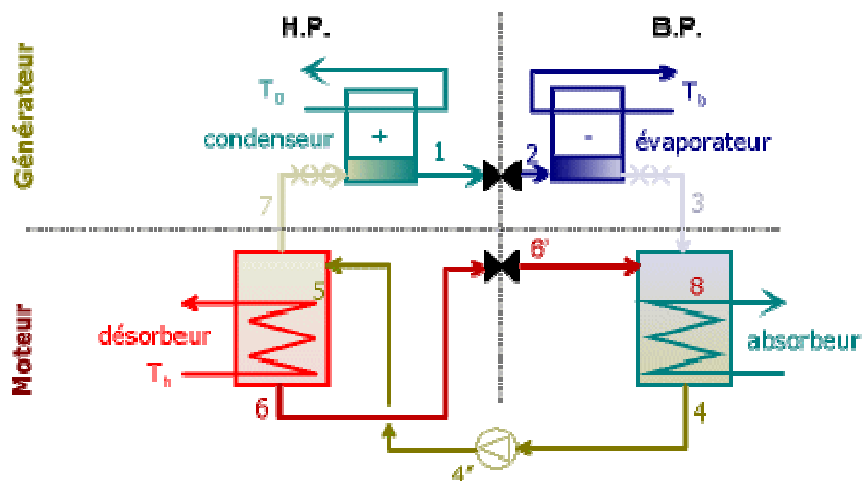
Les refroidisseurs de liquide à condensation par air trouvent très souvent leur place en toiture terrasse de bâtiments. Ils ne nécessitent pas de création de locaux supplémentaires. Pour les fortes puissances et les bâtiments de grande taille, une ou plusieurs sous stations peuvent être nécessaires. Les refroidisseurs de liquide à condensation par eau nécessitent un local pour accueillir le refroidisseurs, les aérorefrigerants sec ou humide peuvent être implantés en toiture.

Notons que pour les fortes puissances (puissance électrique >250kW), il est nécessaire de prévoir un poste transformateur pour l'alimentation électrique du refroidisseur de liquide.

### **1.2.2. Refroidisseur de liquide à absorption**

#### d) Principe de fonctionnement

Les refroidisseurs à absorption font partie de la famille thermodynamique des machines trithermes, c'est à dire qui utilisent trois niveaux de températures pour fonctionner. Le premier niveau de température correspond à la température froide, le second à la température ambiante et le dernier à la température de la source chaude. Les refroidisseurs à absorption utilisent directement la chaleur comme source première d'énergie pour produire du froid contrairement au refroidisseur de liquide à compression qui utilise une énergie mécanique.



*Figure 4 : Schéma de principe d'un refroidisseur à absorption*

La source chaude peut être la fumée provenant directement de la combustion, ou encore de la vapeur d'eau ou de l'eau chaude. Ici, la solution envisagée utilise un réseau de chaleur BP, les machines à absorption sont de type simple effet.

La production de froid via un groupe à absorption s'accompagne d'un important rejet de chaleur au condenseur à une température intermédiaire. En effet, les coefficients de performance des machines à absorption à simple effet (fonctionnant avec une température de source chaude de 130°C) sont compris entre 0.6 et 0.75. Les rejets de chaleur au condenseur sont de l'ordre de 2.5 fois la puissance frigorifique (ils sont de l'ordre de 1.3 fois la puissance frigorifique pour un refroidisseur à compression).

La principale contrainte des machines à absorption réside dans l'obligation de respecter une température de 30°C à l'entrée du condenseur. Cette contrainte nécessite d'utiliser une tour aéro-refrigerante humide ou une nappe phréatique.

#### e) Puissance frigorifique disponibles

Sur le marché français, les puissances frigorifiques disponibles s'échelonnent de 35kW à plusieurs MW. Cependant, l'offre se caractérise par :

Les machines de faibles puissances, de 35kW à 105 kW, fournies exclusivement par YAZAKI qui dispose d'une structure nationale pour l'importation de ses produits

Les machines de fortes puissances, à partir de 300 kW, fournies par CARRIER, TRANE et YORK. Ces deux derniers ont abandonné la distribution des machines de puissance inférieure à 1MW.

#### f) Mise en oeuvre

Les refroidisseurs de liquide à absorption nécessitent un local, les aérorefrigerants humides peuvent être implantés toiture.

### **1.2.3. Tour de refroidissement**

#### a) Principe de fonctionnement

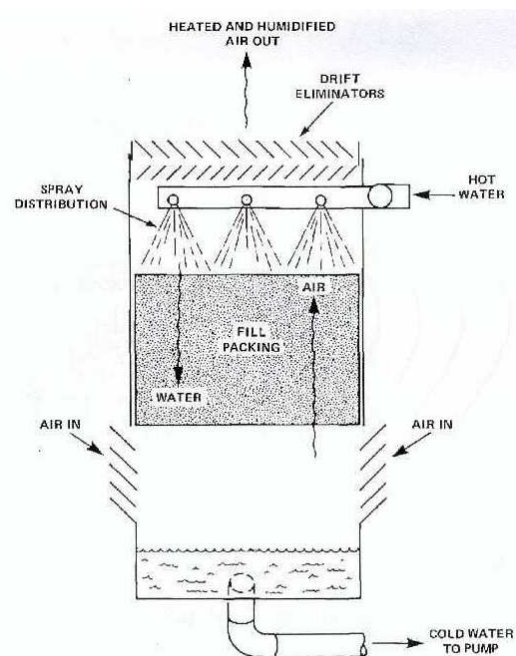
Comme nous l'avons évoqué, les machines thermodynamiques de production de froid ont besoin d'être refroidi. La source de ce refroidissement est usuellement le sol, l'eau ou l'air. Les deux premières sources de refroidissement peuvent être contraignantes et peuvent ne pas toujours être employées.

L'air ambiant peut alors être employé pour le refroidissement des machines. Cependant, la température de l'air, élevée en été, peut être incompatible avec les régimes de fonctionnement des machines thermodynamiques, et tout particulièrement avec les machines à absorption. En effet, les machines à absorption nécessitent des températures de retour de l'ordre de 30°C.

Pour réaliser cette objectif en employant de l'air dont la température est supérieure, il est possible d'utiliser les propriétés de l'air humide, et notamment la vaporisation de l'eau dans l'air en récupérant la chaleur latente.

La mise en œuvre de ce principe est réalisée par des tours de refroidissement (aéroréfrigérants) humide. Les aéroréfrigérants humides sont soit des échangeurs à contact direct entre les deux fluides favorisant le transfert de chaleur (tours ouvertes) soit des échangeurs à tubes arrosés (tours fermées).

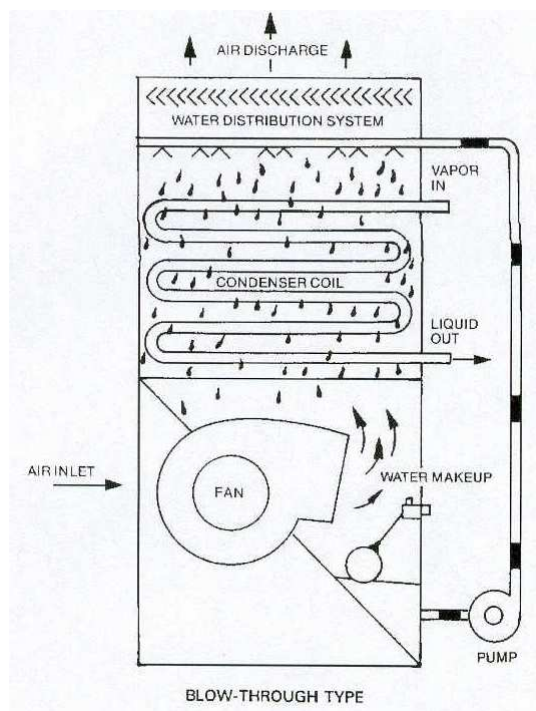
Les tours ouvertes sont soit à contre courant soit à courants croisés. Le transfert de chaleur entre l'air et l'eau est accompli par évaporation de l'eau dans l'air et par transfert de chaleur sensible de l'eau vers l'air. L'air est humidifié tandis que l'eau non évaporée est refroidie à une température approchant la température humide de l'air. L'eau s'écoule sur une surface d'échange, appelée packing, qui favorisent les échanges. Une tour aéroréfrigérante humide ouverte à contre courant est présentée sur la suivante.



*Figure 5 : Schéma de principe d'une tour ouverte*

Les tours fermées sont constituées de serpentins dans lesquels passe le fluide à refroidir, la batterie formée des serpentins est arrosée par un spray d'eau tandis que l'air est soufflé sur

celle-ci à contre courant de l'écoulement du spray. Ces tours permettent d'augmenter le refroidissement par rapport aux tours sèches du fait de la vaporisation du spray dans l'air. Une tour aérorefrigérante humide fermée à contre courant est présentée sur la suivante



*Figure 6 : Schéma de principe d'une tour fermée*

Malgré une efficacité légèrement moins bonne (pincement de température plus large), les tours fermées offrent l'avantage de faciliter les traitements anti-légionellose et une possibilité de fonctionnement en régime sec pour la mi-saison.

## **2. ETUDE ECONOMIQUE**

Il s'agit dans ce chapitre d'établir le coût résultant de la chaleur fournie par différents systèmes de production de froid.

Le coût résultant du froid dépend :

- Des charges de fonctionnement, énergie et entretien
- De l'investissement initial, du coût des travaux

### **2.1. CHIFFRAGE DES INVESTISSEMENTS**

Le chiffrage des investissements a été réalisé en identifiant :

- Le génie civil et les surfaces nécessaires à la réalisation de l'équipement, compte tenu des faibles surfaces nécessaires au regard de la taille des bâtiments, nous ne considérerons pas de dégressivité des coûts en fonction de la surface.
- Le processus de production de froid
- Les équipements connexes, hydraulique et électricité
- Les réseaux principaux, et secondaires nécessaires à la distribution de froid, les réseaux ont été chiffrés sur la base des mètres et prix moyens au mètre linéaire pour les solutions centralisées
- Les sous-stations
- des charges d'ingénierie, contrôle technique...

Ces chiffrages ont été réalisés sur la base de coûts constatés sur des opérations traitées par GIRUS. Le coût des machines à absorption a été déterminé par la consultation de fournisseurs. Ces chiffrages ont été réalisés dans un objectif de comparaison en coût global, et dans un cadre générale, dès lors ces chiffrages ne pourraient être employés directement et sans discernement sur des opérations sans validation et analyse des conditions de faisabilité.

### 2.1.1. Investissement pour le scénario décentralisé 35kW

				Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée
Descriptif	U	Q	PU	Montant € HT TOTAL	Montant € HT TOTAL
<b>Puissance frigorifique</b>				<b>35 kW</b>	<b>35 kW</b>
<b>I1 - Bâtiment process et aménagements extérieurs</b>					
Foncier	ens	1		pm	pm
Bâtiment	m2	9	0	00 €	
Bâtiment	m2	9	1000		9 000 €
<b>Sous total bâtiment et VRD :</b>				<b>00 €</b>	<b>9 000 €</b>
<b>I2 - Process industriel froid</b>					
Groupe compression 35 kW cond air	u	1	10000	10 000 €	
Groupe absorption 100kW	u	1	20000		20 000
Tour aerorefrigerante humide	u	1	10000		10 000
<b>Sous total process :</b>				<b>10 000 €</b>	<b>30 000 €</b>
<b>I3 - Equipements connexes</b>					
Aménagement hydraulique, comptage calorifique, collecteurs et pompes	ens	1		2 000 €	2 500 €
Electricité - régulation	ens	1		2 000 €	1 000 €
<b>Sous total équipements connexes</b>				<b>4 000 €</b>	<b>3 500 €</b>
<b>TOTAL TRAVAUX I1 + I2 +I3</b>				<b>14 000 €</b>	<b>42 500 €</b>
Divers, imprévus et révisions de prix	%	5%		<b>700 €</b>	<b>2 125 €</b>
Ingenierie, assurance, ...	%	10%		<b>1 400 €</b>	<b>4 250 €</b>
<b>TOTAL TRAVAUX FROID</b>				<b>16 100 €</b>	<b>48 875 €</b>
Ratio installation / kW nécessaire				460 € HT/kW	1396 € HT/kW

*Tableau 1 : Investissement pour la création d'une production de froid de 35kW*

## 2.1.2. Investissement pour le scénario décentralisé 100kW

				Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée
Descriptif	U	Q	PU	Montant € HT TOTAL	Montant € HT TOTAL
<b>Puissance frigorifique</b>				<b>100 kW</b>	<b>100 kW</b>
<b>I1 - Bâtiment process et aménagements extérieurs</b>					
Foncier	ens	1		pm	pm
Bâtiment	m2	9	0	00 €	
Bâtiment	m2	9	1000		9 000 €
<b>Sous total bâtiment et VRD :</b>				<b>00 €</b>	<b>9 000 €</b>
<b>I2 - Process industriel froid</b>					
Groupe compression 100 kW cond air	u	1	25000	25 000 €	
Groupe absorption 100kW	u	1	35000		35 000
Tour aerorefrigerante humide	u	1	15000		15 000
<b>Sous total process :</b>				<b>25 000 €</b>	<b>50 000 €</b>
<b>I3 - Equipements connexes</b>					
Aménagement hydraulique, comptage calorifique, collecteurs et pompes	ens	1		3 000 €	6 000 €
Electricité - régulation	ens	1		8 000 €	2 000 €
<b>Sous total équipements connexes</b>				<b>11 000 €</b>	<b>8 000 €</b>
<b>TOTAL TRAVAUX I1 + I2 +I3</b>				<b>36 000 €</b>	<b>67 000 €</b>
Divers, imprévus et révisions de prix	%	5%		1 800 €	3 350 €
Ingenierie, assurance, ...	%	10%		3 600 €	6 700 €
<b>TOTAL TRAVAUX FROID</b>				<b>41 400 €</b>	<b>77 050 €</b>
Ratio installation / kW nécessaire				414 € HT/kW	771 € HT/kW

Tableau 2 : Investissement pour la création d'une production de froid de 100 kW

### 2.1.3. Investissement pour le scénario décentralisé 300kW

				Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée
Descriptif	U	Q	PU	Montant € HT TOTAL	Montant € HT TOTAL
<b>Puissance frigorifique</b>				<b>300 kW</b>	<b>300 kW</b>
<b>I1 - Bâtiment process et aménagements extérieurs</b>					
Foncier	ens	1		pm	pm
Bâtiment	m2		1000	00 €	
Bâtiment	m2	20	1000		20 000 €
<b>Sous total bâtiment et VRD :</b>				<b>00 €</b>	<b>20 000 €</b>
<b>I2 - Process industriel froid</b>					
Groupe compression cond air	u	1	55000	55 000 €	
Groupe absorbtion	u	1	70000		70 000
Tour aerorefrigerante humide	u	1	22000		22 000
<b>Sous total process :</b>				<b>55 000 €</b>	<b>92 000 €</b>
<b>I3 - Equipements connexes</b>					
Aménagement hydraulique, comptage calorifique, collecteurs et pompes	ens	1		10 000 €	13 000 €
Electricité - régulation	ens	1		18 000 €	3 000 €
<b>Sous total équipements connexes</b>				<b>28 000 €</b>	<b>16 000 €</b>
<b>TOTAL TRAVAUX I1 + I2 +I3</b>				<b>83 000 €</b>	<b>128 000 €</b>
Divers, imprévus et révisions de prix	%	5%		4 150 €	6 400 €
Ingenierie, assurance, ...	%	10%		8 300 €	12 800 €
<b>TOTAL TRAVAUX FROID</b>				<b>95 450 €</b>	<b>147 200 €</b>
Ratio installation / kW nécessaire				318 € HT/kW	491 € HT/kW

*Tableau 3 : Investissement pour la création d'une production de froid de 300 kW*

				Froid par Compression décentralisée	Froid par Absorption décentralisée
Descriptif	U	Q	PU	Montant € HT TOTAL	Montant € HT TOTAL
<b>Puissance frigorifique</b>				<b>300 kW</b>	<b>300 kW</b>
<b>I1 - Bâtiment process et aménagements extérieurs</b>					
Foncier	ens	1		pm	pm
Bâtiment	m2		1000	00 €	
Bâtiment	m2	20	1000		20 000 €
<b>Sous total bâtiment et VRD :</b>				<b>00 €</b>	<b>20 000 €</b>
<b>I2 - Process industriel froid</b>					
Groupe compression cond air	u	1	55000	55 000 €	
Groupe absorbtion	u	1	70000		70 000
Tour aerorefrigerante humide	u	1	22000		22 000
<b>Sous total process :</b>				<b>55 000 €</b>	<b>92 000 €</b>
<b>I3 - Equipements connexes</b>					
Aménagement hydraulique, comptage calorifique, collecteurs et pompes	ens	1		10 000 €	13 000 €
Electricité - régulation	ens	1		18 000 €	3 000 €
<b>Sous total équipements connexes</b>				<b>28 000 €</b>	<b>16 000 €</b>
<b>I4 - Réseau de froid et distribution</b>					
Réseau de froid	m	100	400	40 000 €	40 000 €
Sous-station	kW	300	100	30 000 €	30 000 €
<b>Sous total équipements connexes</b>				<b>70 000 €</b>	<b>70 000 €</b>
<b>TOTAL TRAVAUX I1 + I2 +I3 +I4</b>				<b>153 000 €</b>	<b>198 000 €</b>
Divers, imprévus et révisions de prix	%	5%		<b>7 650 €</b>	<b>9 900 €</b>
Ingenierie, assurance, ...	%	10%		<b>15 300 €</b>	<b>19 800 €</b>
<b>TOTAL TRAVAUX FROID</b>				<b>175 950 €</b>	<b>227 700 €</b>

Tableau 4 : Investissement pour la création d'une production de froid de 300 kW et du réseau de distribution

## 2.1.4. Investissement pour le scénario décentralisé 1000kW

				Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée
Descriptif	U	Q	PU	Montant € HT TOTAL	Montant € HT TOTAL
<b>Puissance frigorifique</b>				<b>1000 kW</b>	<b>1000 kW</b>
<b>I1 - Bâtiment process et aménagements extérieurs</b>					
Foncier	ens	1		pm	pm
Bâtiment	m2			20 000 €	
Bâtiment	m2	50	1000		50 000 €
<b>Sous total bâtiment et VRD :</b>				<b>20 000 €</b>	<b>50 000 €</b>
<b>I2 - Process industriel froid</b>					
Groupe compression cond air	u	1	140000	140 000 €	
Groupe absorbtion	u	1	180000		180 000
Tour aerorefrigerante humide	u	1	45000		45 000
<b>Sous total process :</b>				<b>140 000 €</b>	<b>225 000 €</b>
<b>I3 - Equipements connexes</b>					
Aménagement hydraulique, comptage calorifique, collecteurs et pompes	ens	1		25 000 €	28 000 €
Electricité - régulation	ens	1		50 000 €	7 000 €
<b>Sous total équipements connexes</b>				<b>75 000 €</b>	<b>35 000 €</b>
<b>TOTAL TRAVAUX I1 + I2 +I3</b>				<b>235 000 €</b>	<b>310 000 €</b>
Divers, imprévus et révisions de prix	%	5%		11 750 €	15 500 €
Ingenierie, assurance, ...	%	10%		23 500 €	31 000 €
<b>TOTAL TRAVAUX FROID</b>				<b>270 250 €</b>	<b>356 500 €</b>

Ratio installation / kW nécessaire

270 € HT/kW

357 € HT/kW

Tableau 5 : Investissement pour la création d'une production de froid de 1000 kW

				Froid par Compression décentralisée	Froid par Absorption décentralisée
Descriptif	U	Q	PU	Montant € HT TOTAL	Montant € HT TOTAL
<b>Puissance frigorifique</b>				<b>1000 kW</b>	<b>1000 kW</b>
<b>I1 - Bâtiment process et aménagements extérieurs</b>					
Foncier	ens	1		pm	pm
Bâtiment	m2			20 000 €	
Bâtiment	m2	50	1000		50 000 €
<b>Sous total bâtiment et VRD :</b>				<b>20 000 €</b>	<b>50 000 €</b>
<b>I2 - Process industriel froid</b>					
Groupe compression cond air	u	1	140000	140 000 €	
Groupe absorbtion	u	1	180000		180 000
Tour aerorefrigerante humide	u	1	45000		45 000
<b>Sous total process :</b>				<b>140 000 €</b>	<b>225 000 €</b>
<b>I3 - Equipements connexes</b>					
Aménagement hydraulique, comptage calorifique, collecteurs et pompes	ens	1		25 000 €	28 000 €
Electricité - régulation	ens	1		50 000 €	7 000 €
<b>Sous total équipements connexes</b>				<b>75 000 €</b>	<b>35 000 €</b>
<b>I4 - Réseau de froid et distribution</b>					
Réseau de froid	m	300	500	150 000 €	150 000 €
Sous-station	kW	1000	100	100 000 €	100 000 €
<b>Sous total équipements connexes</b>				<b>250 000 €</b>	<b>250 000 €</b>
<b>TOTAL TRAVAUX I1 + I2 +I3 +I4</b>				<b>485 000 €</b>	<b>560 000 €</b>
Divers, imprévus et révisions de prix	%	5%		<b>24 250 €</b>	<b>28 000 €</b>
Ingenierie, assurance, ...	%	10%		<b>48 500 €</b>	<b>56 000 €</b>
<b>TOTAL TRAVAUX FROID</b>				<b>557 750 €</b>	<b>644 000 €</b>

*Tableau 6 : Investissement pour la création d'une production de froid de 1000 kW et du réseau de distribution*

## 2.2. HYPOTHESES DE CALCUL POUR L'ETABLISSEMENT DES BILANS DE FONCTIONNEMENT

Le bilan de fonctionnement permet d'évaluer le coût rendu de l'énergie et il prend en compte l'ensemble des charges suivantes :

1. charges d'énergies et de fluides
2. charges d'exploitation et gros entretien
3. charges financières d'amortissement des installations réalisées

### 2.2.1. Charges d'énergies et de fluides

#### 2.2.1.1 Besoins de froid

Les besoins de froid sont évalués en nombre d'heures de fonctionnement à pleine puissance. Le nombre d'heures de fonctionnement peut varier usuellement entre 500 et 1200 heures.

La répartition des besoins entre la période été et la période hiver est de 85% (hiver de novembre à mars et été d'avril à octobre).

La période de fourniture de froid est 2.5 fois le nombre d'heures de fonctionnement à pleine puissance.

#### 2.2.1.2 Electricité

##### 2.2.1.2.1 Coût de l'électricité

Les coûts d'électricité sont basés sur les tarifs réglementés. Selon les gammes de puissances, différents tarifs sont retenus :

Puissance frigorifique	35kW	100kW	300kW	1000kW
Tarif réglementé	Tarif Bleu	Tarif Jaune UM	Tarif Jaune UM	Tarif Vert MU
Prime fixe abonnement (€/kW)	40.4	48.6	48.6	40.32
Différence de puissance souscrite (kW)	8.0	6.7	20.0	50.0
Coût de l'électricité hiver HP(€/MWh)	77.8	113.7	113.7	68.25
Coût de l'électricité été HP(€/MWh)	77.8	27.8	27.8	27.7

Tableau 7 : Tarif électricité

##### 2.2.1.2.2 Consommation l'électricité

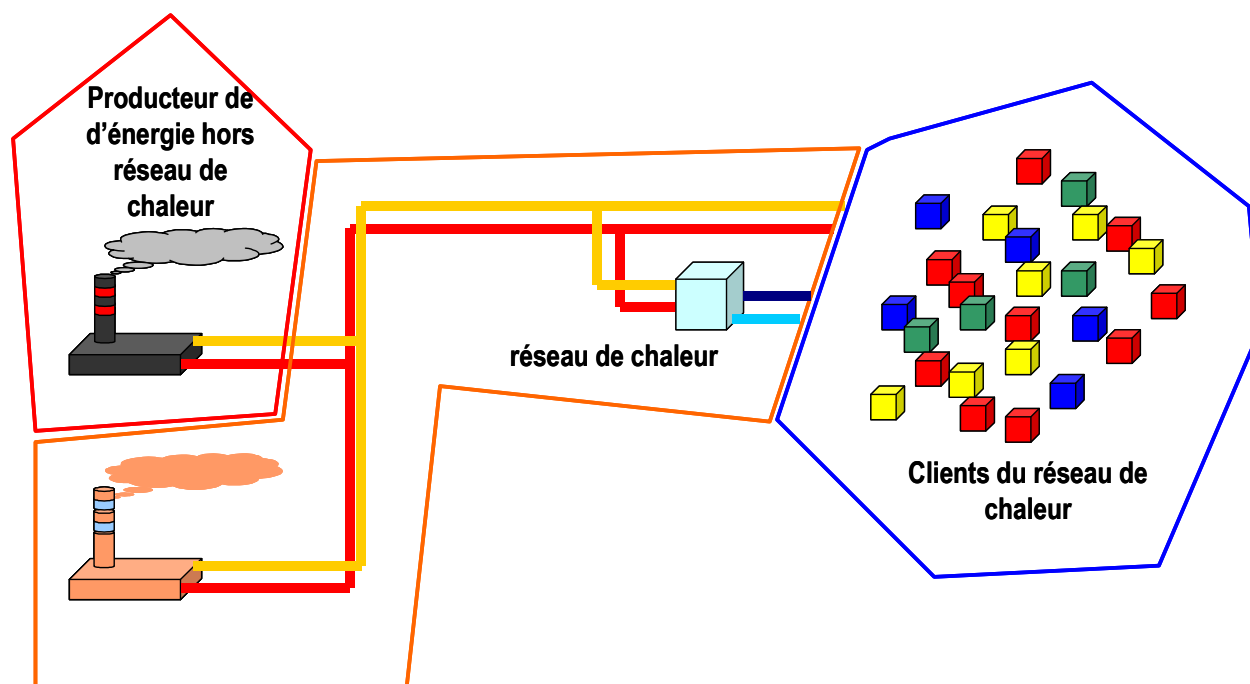
Les consommations d'électricité des groupes frigorifiques à compression et condensation à air sont basées sur l'emploi du ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio) défini par un standard Eurovent<sup>1</sup>. Ce ratio est pris par défaut à 3.

Les autres consommations dues aux auxiliaires (pompes de circulation,...) sont estimées à partir des puissances installées et d'un temps moyen de fonctionnement, estimé à 2.5 fois le temps de fonctionnement à pleine puissance, correspondant au temps de fonctionnement global de l'installation.

### 2.2.1.3 Chaleur

Les consommations de chaleur sont calculés sur l'hypothèse d'un rendement de production des machines à absorption de 70%.

Concernant le coût de la chaleur, plusieurs raisonnements peuvent être réalisés selon le montage juridique :



*Figure 7 : Installation de production de froid inclus dans le réseau de chaleur*

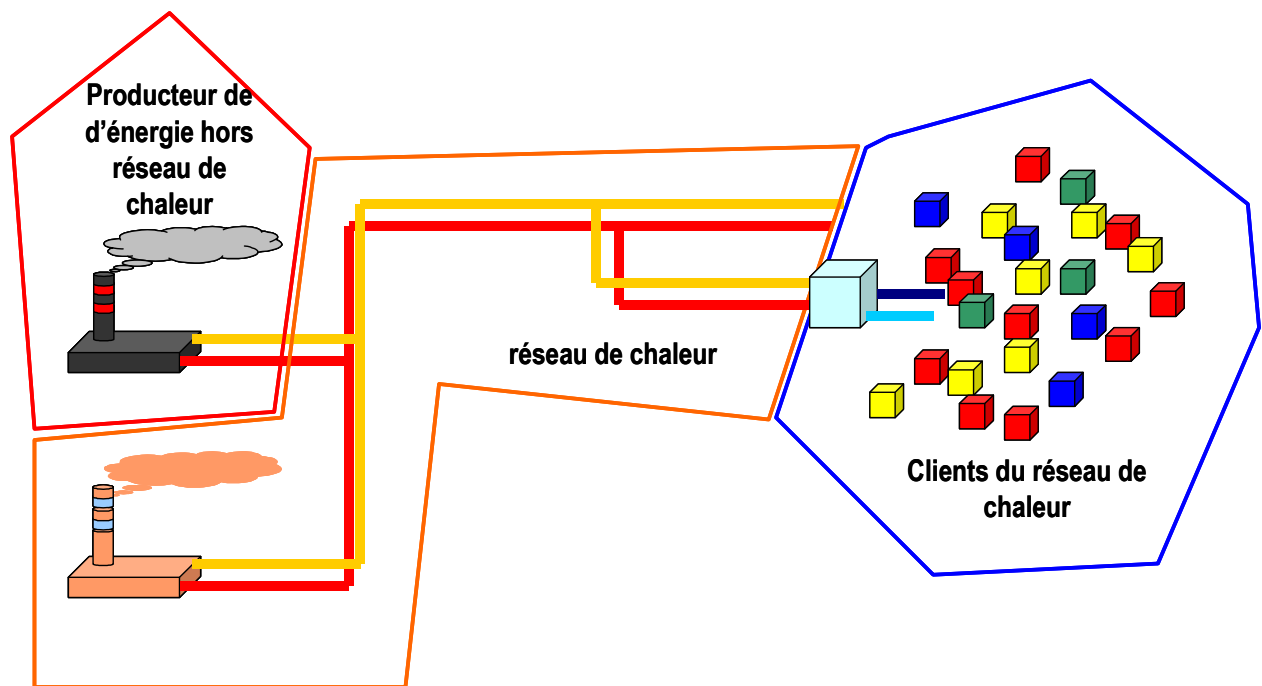
Ce premier raisonnement consiste à intégrer les systèmes de production de froid dans le service de distribution de la chaleur et du froid. Le coût de la chaleur employé dans la

---

<sup>1</sup> Exemple de données : [http://www.eurovent-certification.com/fr/Les\\_produits\\_certifies.php?lg=fr&rub=03&select\\_prog=LCP&select\\_partic=156&select\\_marque=CIAT&select\\_class=LCP%20/%20A%20/%20P%20/%20R%20/%20AC&tri\\_chp=&debut\\_affiche=0&indice\\_affiche=0](http://www.eurovent-certification.com/fr/Les_produits_certifies.php?lg=fr&rub=03&select_prog=LCP&select_partic=156&select_marque=CIAT&select_class=LCP%20/%20A%20/%20P%20/%20R%20/%20AC&tri_chp=&debut_affiche=0&indice_affiche=0)

machine à absorption peut être à minima le prix courant de cette chaleur. Pour ne pas défavoriser le bilan énergétique des UIOM, trois cas peuvent être envisagés :

1. La chaleur de l'UIOM peut être valorisée électriquement. Dans ce cas, la recette de vente d'électricité été peut être comprise entre 7 et 8 € HT/MWh thermique (avec un rendement de production de 30% élevé<sup>2</sup>). De plus, si la chaleur n'est pas intégralement valorisée sous forme électrique (cas de la turbine à contre-pression qui permet la valorisation thermique derrière la valorisation électrique), cette valeur peut être revue à la baisse.
2. La chaleur en sortie de la turbine à contre-pression est intégralement valorisable sur le réseau de chaleur sans perte de recette pour l'usine. Dans ce cas, la chaleur pourrait être cédée gratuitement pour la climatisation d'été.
3. La chaleur produite par l'UIOM est revendue au réseau de chaleur aux conditions usuelles, estimé a priori 20€HT/MWh (en absence d'éléments précis et généralisable sur les conditions de production de la chaleur par l'UIOM).



*Figure 8 : Installation de production de froid fonctionnant avec la chaleur du réseau de chaleur*

<sup>2</sup> La rémunération de l'énergie été est proportionnelle à la proportionnelle à l'énergie produite (la prime fixe est calculée par rapport à la production en période hiver), la rémunération de l'énergie d'été est comprise entre 2.88 et 2.12 c€/kWh ; arrêté du 2 octobre 2001 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent des déchets ménagers ou assimilés, à l'exception des installations utilisant du biogaz

La distribution de froid n'est pas un service du réseau de chaleur, le client final ou un groupe de client finaux utilise la chaleur du réseau pour des applications de production de froid, le coût de la chaleur peut être au maximum le coût de vente de la chaleur usuel, estimé à 50 €/MWh en prenant la moyenne calculée par l'association AMORCE lors de sa dernière enquête de prix de chaleur sur 97 réseaux de chaleur en France.

	Coût de la chaleur été	Coût de la chaleur hiver
Coût de la chaleur en cas d'absence de valorisation électrique de la chaleur UIOM ou avec valorisation électrique avec turbine à contre pression	0 €/MWh	20 €/MWh
Coût de la chaleur en cas de valorisation électrique de la chaleur UIOM	7 €/MWh	20 €/MWh
Coût de la chaleur sans distinction des usages	20 €/MWh	20 €/MWh
Coût de la chaleur en cas de production de froid extérieure au réseau de chauffage	50 €/MWh	50 €/MWh

*Tableau 8 : Différents montages de valorisation de la chaleur*

Pour le cas de base, nous avons considéré que la chaleur utilisée fait de la chaleur payante sans distinction des usages.

### **2.2.2. Charges d'exploitation et de gros entretien**

Le poste des charges P2 correspond aux charges d'entretien, c'est à dire les charges personnels nécessaire à la conduite des installations, et à la réalisation des opérations d'entretien et de maintenance.

Le poste P2 est calculé sur la base d'une évaluation du temps passé et sur les retours d'expérience des fournisseurs de machine à absorption. Les prestations P2 concernent les équipements suivants :

- La tour de refroidissement (Déconcentration, Contrôle de fonctionnement, Nettoyage, ...)
- Les pompes (Contrôle du presse étoupe, Relevé heures de fonctionnement, Permutation des pompes, Nettoyage filtres, ...)
- Les réseaux hydrauliques (étanchéité des vannes d'isollements, nettoyage des filtres, évacuation des boues, ...)
- Le groupe à absorption (Etanchéité des réseaux, Fonctionnements des pompes, sondes de température, ...)

Les dépenses de GER correspondent aux travaux de gros entretien et renouvellement des installations, c'est à dire réparation ou remplacement des pièces, des parties d'équipements

nécessaires au maintien en bon fonctionnement. Les valeurs sont évaluées par rapport aux coûts de remplacement des équipements, et à leur probable durée de vie.

La durée de vie probable et la prise en compte dans le calcul du P3 sont indiqués dans le tableau suivant.

Type d'équipement	Durée de vie moyenne	Pris en compte dans le calcul du P3
Gros oeuvre	50 ans	Non
Groupe à compression	15 ans	Non
Groupe à absorption	20 ans	Non
Tour de refroidissement	15 ans	Non
Equipements hydrauliques	10 ans	Oui
Equipements électriques	10 ans	Oui

Tableau 9 : Gros renouvellement des équipements

Le nombre d'heure de fonctionnement est supposé sans influence sur les montants P2 et P3.

### **2.2.3. Charges financières liées à l'amortissement des installations**

Le poste « financement » correspond aux annuités de remboursement des emprunts contractés au taux de 6% par an, sur une durée de 15 ans pour le financement des investissements en déduisant préalablement la valeur résiduelle. Cette approche permet de prendre en compte les différences de durée de vie des équipements.

Le calcul des annuités est réalisé par rapport à la différence Investissement – VR (valeur résiduelle), et de fait ne prend pas en compte la différence temporelle entre Investissement et la VR, et les charges liées à l'immobilisation financière.

Dans les calculs des bilans de fonctionnement, nous n'avons pas supposé de subvention public.

## 2.3. BILANS DE FONCTIONNEMENT

### 2.3.1. Bilan de fonctionnement de base

#### 2.3.1.1 Etude de cas

		Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée
Unités			
<b>P1 - ENERGIE</b>			
Puissance frigorifique	kW	35	35
EER nominal		3	0.7
Puissance absorbée par les auxiliaires	kW		0.5
Nombre d'heures de fonctionnement équivalent à pleine puissance	h	800	800
Nombre d'heures de fonctionnement	h	2000	2000
Besoin de froid	kWh	28 000	28 000
ESEER groupe frigorifique		3.0	0.7
répartition été/ hiver		85%	85%
Consommations électricité	kWh	9 333	1 000
Dont hiver	kWh	1 400	150
dont été	kWh	7 933	850
Consommations de chaleur	kWh		40 000
Dont hiver	kWh		6 000
dont été	kWh		34 000
Consommation d'eau	m3		49
Prime fixe abonnement Tarif Bleu	€ H.T./kW	40.4	
Différence de puissance souscrite Tarif Bleu	kW	8.0	
Cout de l'électricité hiver Tarif Bleu	€ H.T./MWh	77.8	77.8
Cout de l'électricité été Tarif Bleu	€ H.T./MWh	77.8	77.8
Cout de la chaleur hiver	€ H.T./MWh		20.0
Cout de la chaleur été	€ H.T./MWh		20.0
Cout de l'eau	€ H.T./m3		1.7
Cout de l'électricité	€ H.T./an	1049	78
Cout de la chaleur	€ H.T./an	0	800
Cout de l'eau	€ H.T./an	0	83
<b>Total charges énergies</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>1 049</b>	<b>961</b>
<b>P2 + P3 - MAINTENANCE + GER</b>			
Entretien P2	€ H.T./an	2 000	4 000
GER - P3	€ H.T./an	400	350
<b>Total charges d'entretien:</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>2 400</b>	<b>4 350</b>
<b>INVESTISSEMENTS</b>			
Total travaux	€ H.T.	16 100	48 875
Valeur résiduelle à 15 ans	€ H.T.	0	12 219
Subvention public	%		0
Durée de financement	ans	15	15
Total travaux - Valeur résiduelle à 15ans - Subvention	€ H.T.	16 100	36 656
Taux	%	6	6
<b>Annuité annuelle d'investissement</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>1 658</b>	<b>3 774</b>
<b>TOTAL DES CHARGES ANNUELLES</b>			
<b>(P1 + P2 + P3 + P4)</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>5 107</b>	<b>9 085</b>
Prix moyen du MWh	€ H.T.	182.4	324.5

*Tableau 10 : Bilan de fonctionnement pour une production de froid de 35 kW*

		Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée
		Unités	
<b>P1 - ENERGIE</b>			
Puissance frigorifique	kW	100	100
EER nominal		3	0.7
Puissance absorbée par les auxiliaires	kW		1
Nombre d'heures de fonctionnement equivalent à pleine puissance	h	800	800
Nombre d'heures de fonctionnement	h	2000	2000
Besoin de froid	kWh	80 000	80 000
ESEER groupe frigorifique		3.0	0.7
répartition ete/ hiver		85%	85%
Consommations électricité	kWh	26 667	2 000
Dont hiver	kWh	4 000	300
dont été	kWh	22 667	1 700
Consommations de chaleur	kWh		114 286
Dont hiver	kWh		17 143
dont été	kWh		97 143
Consommation d'eau	m3		140
Prime fixe abonnement tarif jaune UM	€ H.T./kW	48.6	
Difference de puissance souscrite Tarif Jaune UM	kW	6.7	
Cout de l'électricité hiver Tarif Jaune UM	€ H.T./MWh	113.7	113.7
Cout de l'électricité été Tarif Jaune UM	€ H.T./MWh	27.8	27.8
Cout de la chaleur hiver	€ H.T./MWh		20.0
Cout de la chaleur été	€ H.T./MWh		20.0
Cout de l'eau	€ H.T./m3		1.7
Cout de l'électricité	€ H.T./an	1409	81
Cout de la chaleur	€ H.T./an	0	2 286
Cout de l'eau	€ H.T./an	0	238
<b>Total charges energies</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>1 409</b>	<b>2 605</b>
<b>P2 + P3 - MAINTENANCE + GER</b>			
Entretien P2	€ H.T./an	2 000	4 000
GER - P3	€ H.T./an	1 100	800
<b>Total charges d'entretien:</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>3 100</b>	<b>4 800</b>
<b>INVESTISSEMENTS</b>			
Total travaux	€ H.T.	41 400	77 050
Valeur residuelle à 15 ans	€ H.T.	0	19 263
Subvention public	%		0
Durée de financement	ans	15	15
Total travaux - Valeur residuelle à 15ans - Subvention	€ H.T.	41 400	57 788
Taux	%	6	6
<b>Annuité annuelle d'investissement</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>4 263</b>	<b>5 950</b>
<b>TOTAL DES CHARGES ANNUELLES</b>			
<b>(P1 + P2 + P3 + P4)</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>8 772</b>	<b>13 355</b>
Prix moyen du MWh	€ H.T.	109.6	166.9

*Tableau 11 : Bilan de fonctionnement pour une production de froid de 100 kW*

			Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée
		Unités		
<b>P1 - ENERGIE</b>				
	Puissance frigorifique	kW	300	300
	EER nominal		3	0.7
	Puissance absorbée par les auxiliaires	kW		2
	Nombre d'heures de fonctionnement equivalent à pleine puissance	h	800	800
	Nombre d'heures de fonctionnement	h	2000	2000
	Besoin de froid	kWh	240 000	240 000
	ESEER groupe frigorifique		3.0	0.7
	répartition ete/ hiver		85%	85%
	Consommations électricité	kWh	80 000	4 000
	Dont hiver	kWh	12 000	600
	dont été	kWh	68 000	3 400
	Consommations de chaleur	kWh		342 857
	Dont hiver	kWh		51 429
	dont été	kWh		291 429
	Consommation d'eau	m3		420
	Prime fixe abonnement Tarif Jaune UM	€ H.T./kW	48.6	
	Difference de puissance souscrite Tarif Jaune UM	kW	20.0	
	Cout de l'électricité hiver Tarif Jaune UM	€ H.T./MWh	113.7	113.7
	Cout de l'électricité été Tarif Jaune UM	€ H.T./MWh	27.8	27.8
	Cout de la chaleur hiver	€ H.T./MWh		20.0
	Cout de la chaleur été	€ H.T./MWh		20.0
	Cout de l'eau	€ H.T./m3		1.7
	Cout de l'électricité	€ H.T./an	4227	163
	Cout de la chaleur	€ H.T./an	0	6 857
	Cout de l'eau	€ H.T./an	0	713
	<b>Total charges energies</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>4 227</b>	<b>7 733</b>
<b>P2 + P3 - MAINTENANCE + GER</b>				
	Entretien P2	€ H.T./an	3 000	5 000
	GER - P3	€ H.T./an	2 800	1 600
	<b>Total charges d'entretien:</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>5 800</b>	<b>6 600</b>
<b>INVESTISSEMENTS</b>				
	Total travaux	€ H.T.	95 450	147 200
	Valeur residuelle à 15 ans	€ H.T.	0	36 800
	Subvention public	%		0
	Durée de financement	ans	15	15
	Total travaux - Valeur residuelle à 15ans - Subvention	€ H.T.	95 450	110 400
	Taux	%	6	6
	<b>Annuité annuelle d'investissement</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>9 828</b>	<b>11 367</b>
	<b>TOTAL DES CHARGES ANNUELLES</b>			
	<b>(P1 + P2 + P3 + P4)</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>19 855</b>	<b>25 700</b>
	Prix moyen du MWh	€ H.T.	82.7	107.1

*Tableau 12 : Bilan de fonctionnement pour une production de froid de 300 kW*

		Froid par Compression decentralisée	Froid par Absorption decentralisé
		Unités	
<b>P1 - ENERGIE</b>			
Puissance frigorifique	kW	300	300
EER nominal		3	0.7
Puissance absorbée par les auxiliaires	kW	2	4
Nombre d'heures de fonctionnement equivalent à pleine puissance	h	800	800
Nombre d'heures de fonctionnement	h	2000	2000
Besoin de froid	kWh	240 000	240 000
ESEER groupe frigorifique		3.0	0.7
répartition ete/ hiver		85%	85%
Consommations électricité	kWh	82 800	8 000
Dont hiver	kWh	12 420	1 200
dont été	kWh	70 380	6 800
Consommations de chaleur	kWh		342 857
Dont hiver	kWh		51 429
dont été	kWh		291 429
Consommation d'eau	m3		420
Prime fixe abonnement Tarif Jaune UM	€ H.T./kW	48.6	
Difference de puissance souscrite Tarif Jaune UM	kW	20.0	
Cout de l'électricité hiver Tarif Jaune UM	€ H.T./MWh	113.7	113.7
Cout de l'électricité été Tarif Jaune UM	€ H.T./MWh	27.8	27.8
Cout de la chaleur hiver	€ H.T./MWh		20.0
Cout de la chaleur été	€ H.T./MWh		20.0
Cout de l'eau	€ H.T./m3		1.7
Cout de l'électricité	€ H.T./an	4341	325
Cout de la chaleur	€ H.T./an	0	6 857
Cout de l'eau	€ H.T./an	0	713
<b>Total charges energies</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>4 341</b>	<b>7 896</b>
<b>P2 + P3 - MAINTENANCE + GER</b>			
Entretien P2	€ H.T./an	4 500	5 000
GER - P3	€ H.T./an	2 800	1 600
<b>Total charges d'entretien:</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>7 300</b>	<b>6 600</b>
<b>INVESTISSEMENTS</b>			
Total travaux	€ H.T.	175 950	227 700
Valeur residuelle à 15 ans	€ H.T.	56 350	93 150
Subvention public	%		0
Durée de financement	ans	15	15
Total travaux - Valeur residuelle à 15ans - Subvention	€ H.T.	119 600	134 550
Taux	%	6	6
<b>Annuitée annuelle d'investissement</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>12 314</b>	<b>13 854</b>
<b>TOTAL DES CHARGES ANNUELLES</b>			
<b>(P1 + P2 + P3 + P4)</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>23 955</b>	<b>28 350</b>
Prix moyen du MWh	€ H.T.	99.8	118.1

*Tableau 13 : Bilan de fonctionnement pour une production et distribution de froid de 300 kW*

			Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée
		Unités		
<b>P1 - ENERGIE</b>				
	Puissance frigorifique	kW	1000	1000
	EER nominal		3	0.7
	Puissance absorbée par les auxiliaires	kW		7.2
	Nombre d'heures de fonctionnement equivalent à pleine puissance	h	800	800
	Nombre d'heures de fonctionnement	h	2000	2000
	Besoin de froid	kWh	800 000	800 000
	ESEER groupe frigorifique		3.0	0.7
	répartition ete/ hiver		85%	85%
	Consommations électricité	kWh	266 667	14 400
	Dont hiver	kWh	40 000	2 160
	dont été	kWh	226 667	12 240
	Consommations de chaleur	kWh		1 142 857
	Dont hiver	kWh		171 429
	dont été	kWh		971 429
	Consommation d'eau	m3		1 399
	Prime fixe abonnement Tarif Vert MU	€ H.T./kW	40.32	
	Difference de puissance souscrite Tarif Vert MU	kW	50.0	
	Cout de l'électricité hiver Tarif Vert MU	€ H.T./MWh	68.25	68.3
	Cout de l'électricité été Tarif Vert MU	€ H.T./MWh	27.7	27.7
	Cout de la chaleur hiver	€ H.T./MWh		20.0
	Cout de la chaleur été	€ H.T./MWh		20.0
	Cout de l'eau	€ H.T./m3		1.7
	Cout de l'électricité	€ H.T./an	11029	487
	Cout de la chaleur	€ H.T./an	0	22 857
	Cout de l'eau	€ H.T./an	0	2 420
	<b>Total charges energies</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>11 029</b>	<b>25 764</b>
<b>P2 + P3 - MAINTENANCE + GER</b>				
	Entretien P2	€ H.T./an	8 000	10 000
	GER - P3	€ H.T./an	7 500	3 500
	<b>Total charges d'entretien:</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>15 500</b>	<b>13 500</b>
<b>INVESTISSEMENTS</b>				
	Total travaux	€ H.T.	270 250	356 500
	Valeur residuelle à 15 ans	€ H.T.	0	89 125
	Subvention public	%		0
	Durée de financement	ans	15	15
	Total travaux - Valeur residuelle à 15ans - Subvention	€ H.T.	270 250	267 375
	Taux	%	6	6
	<b>Annuitée annuelle d'investissement</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>27 826</b>	<b>27 530</b>
	<b>TOTAL DES CHARGES ANNUELLES</b>			
	<b>(P1 + P2 + P3 + P4)</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>54 355</b>	<b>66 794</b>
	Prix moyen du MWh	€ H.T.	67.9	83.5

*Tableau 14 : Bilan de fonctionnement pour une production de froid de 1000 kW*

		Froid par Compression decentralisée	Froid par Absorption decentralisé
		Unités	
<b>P1 - ENERGIE</b>			
Puissance frigorifique	kW	1000	1000
EER nominal		3	0.7
Puissance absorbée par les auxiliaires	kW	6	13.2
Nombre d'heures de fonctionnement equivalent à pleine puissance	h	800	800
Nombre d'heures de fonctionnement	h	2000	2000
Besoin de froid	kWh	800 000	800 000
ESEER groupe frigorifique		3.0	0.7
répartition ete/ hiver		85%	85%
Consommations électricité	kWh	278 667	26 400
Dont hiver	kWh	41 800	3 960
dont été	kWh	236 867	22 440
Consommations de chaleur	kWh		1 142 857
Dont hiver	kWh		171 429
dont été	kWh		971 429
Consommation d'eau	m3		1 399
Prime fixe abonnement Tarif Vert MU	€ H.T./kW	40.32	
Sur-puissance souscrite Tarif Vert MU	kW	50.0	
Cout de l'électricité hiver Tarif Vert MU	€ H.T./MWh	68.25	68.3
Cout de l'électricité été Tarif Vert MU	€ H.T./MWh	27.7	27.7
Cout de la chaleur hiver	€ H.T./MWh		20.0
Cout de la chaleur été	€ H.T./MWh		20.0
Cout de l'eau	€ H.T./m3		1.7
Cout de l'électricité	€ H.T./an	11435	892
Cout de la chaleur	€ H.T./an	0	22 857
Cout de l'eau	€ H.T./an	0	2 420
<b>Total charges energies</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>11 435</b>	<b>26 169</b>
<b>P2 + P3 - MAINTENANCE + GER</b>			
Entretien P2	€ H.T./an	10 500	12 500
GER - P3	€ H.T./an	7 500	3 500
<b>Total charges d'entretien:</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>18 000</b>	<b>16 000</b>
<b>INVESTISSEMENTS</b>			
Total travaux	€ H.T.	557 750	644 000
Valeur residuelle à 15 ans	€ H.T.	201 250	290 375
Subvention public	%		0
Durée de financement	ans	15	15
Total travaux - Valeur residuelle à 15ans - Subvention	€ H.T.	356 500	353 625
Taux	%	6	6
<b>Annuitée annuelle d'investissement</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>57 427</b>	<b>66 308</b>
<b>TOTAL DES CHARGES ANNUELLES</b>			
<b>(P1 + P2 + P3 + P4)</b>	<b>€ H.T./an</b>	<b>86 862</b>	<b>108 477</b>
Prix moyen du MWh	€ H.T.	108.6	135.6

*Tableau 15 : Bilan de fonctionnement pour une production et distribution de froid de 1000 kW*

### 2.3.1.2 Synthèse

Rappel des principales hypothèses :

Nombre d'heure de fonctionnement à pleine puissance	800 h
Coût de chaleur été	20 €/MWh
Coût de chaleur hiver	20 €/MWh
Coût de l'électricité	TARTAM
Coût de l'eau	1.7€/m <sup>3</sup>

Type de production de froid			Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée	Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée	Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée	Froid par Compression décentralisée	Froid par Absorption décentralisée	Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée	Froid par Compression décentralisée	Froid par Absorption décentralisée
	Unités													
<b>P1 - ENERGIE</b>														
Puissance frigorifique	kW		35	35	100	100	300	300	300	300	1000	1000	1000	1000
EER nominal			3	0.7	3	0.7	3	0.7	3	0.7	3	0.7	3	0.7
Puissance absorbée par les auxiliaires	kW		0	0.5	0	1	0	2	2	4	0	7.2	6	13.2
<b>Nombre d'heures de fonctionnement équivalent à pleine puissance</b>	<b>h</b>		<b>800</b>	<b>800</b>	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
Nombre d'heures de fonctionnement	h		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
<b>Besoin de froid</b>	<b>kWh</b>		<b>28000</b>	<b>28000</b>	<b>80000</b>	<b>80000</b>	<b>240000</b>	<b>240000</b>	<b>240 000</b>	<b>240 000</b>	<b>800000</b>	<b>800000</b>	<b>800 000</b>	<b>800 000</b>
<b>ESEER groupe frigorifique</b>			<b>3</b>	<b>0.7</b>	3	0.7	3	0.7	3	0.7	3	0.7	3	0.7
Répartition ete/ hiver			85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%
Cout de la chaleur hiver	€ H.T./MWh			20										
Cout de la chaleur été	€ H.T./MWh			20										
Cout de l'électricité	0%	€ H.T./an	1 049	78	1 409	81	4 227	163	4 341	325	11 029	487	11 435	892
Cout de la chaleur		€ H.T./an	0	800	0	2 286	0	6 857	0	6 857	0	22 857	0	22 857
Cout de l'eau	-100%	€ H.T./an	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total charges energies</b>		€ H.T./an	<b>1 049</b>	<b>878</b>	<b>1 409</b>	<b>2 367</b>	<b>4 227</b>	<b>7 020</b>	<b>4 341</b>	<b>7 183</b>	<b>11 029</b>	<b>23 344</b>	<b>11 435</b>	<b>23 749</b>
<b>P2 + P3 - MAINTENANCE + GER</b>														
Total charges d'entretien:		€ H.T./an	2400	4350	3100	4800	5800	6600	7300	6600	15500	13500	18000	16000
<b>INVESTISSEMENTS</b>														
Total travaux		€ H.T.	16 100	48 875	41 400	77 050	95 450	147 200	175 950	227 700	270 250	356 500	0	0
Subvention public	%			0		0		0		0		0		0
Taux	%		6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
<b>Annuité annuelle d'investissement</b>		€ H.T./an	<b>1658</b>	<b>3774</b>	<b>4263</b>	<b>5950</b>	<b>9828</b>	<b>11367</b>	<b>12314</b>	<b>13854</b>	<b>27826</b>	<b>27530</b>	<b>57427</b>	<b>66308</b>
<b>TOTAL DES CHARGES ANNUELLES (P1 + P2 + P3 + P4)</b>														
		€ H.T./an	5 107	9 002	8 772	13 117	19 855	24 987	23 955	27 636	54 355	64 374	86 862	106 057
<b>Prix moyen du MWh</b>														
		€ H.T.	182.39	321.50	109.64	163.96	82.73	104.11	99.81	115.15	67.94	80.47	108.58	132.57

*Tableau 16 : Synthèse des bilans de fonctionnement avec les hypothèses de base*

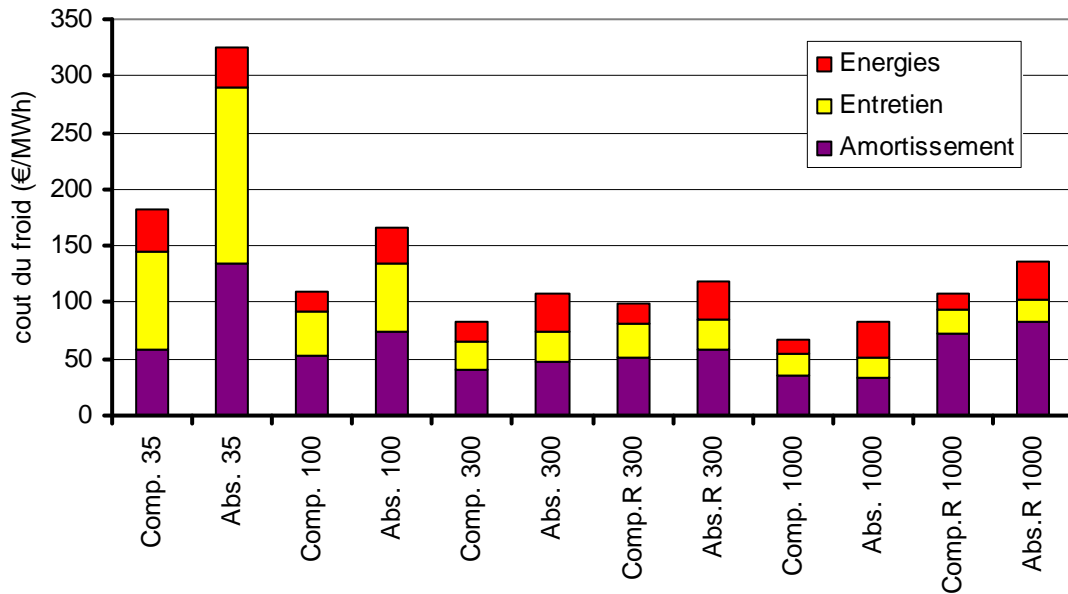


Figure 9: Synthèse des bilans de fonctionnement avec les hypothèses de base

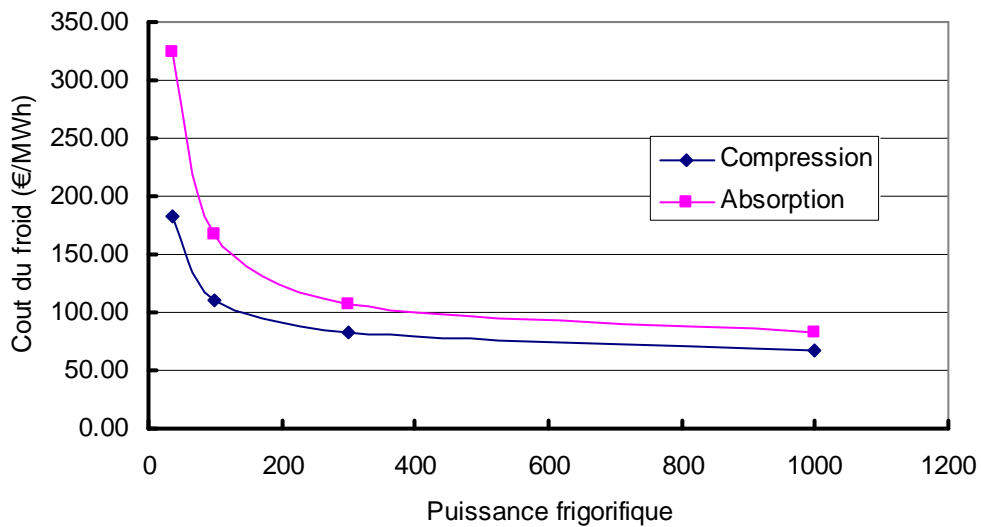


Figure 10: Comparaison des coûts de production du froid

L'analyse des tableaux et figure ci dessus montrent :

- Un coût de fonctionnement pour les puissances inférieure à 100kW important (entre 1.5 et 2 fois supérieur au coût de fonctionnement des machines à compression) pour les machines à absorption s'expliquant par :
  - Les charges d'entretien et de maintenance

- Les charges d'investissement
- Une forte décroissance des coûts de fonctionnement en fonction de la puissance frigorifique due :
  - Pour les machines à compression
    - A la réduction des charges d'énergie (tarif jaune et vert plus avantageux)
    - A la réduction des charges de maintenance
  - Pour les machines à absorption
    - A la réduction des charges d'investissement
    - A la réduction des charges de maintenance (notamment du P3)
    - Les charges d'énergies restent fixes
- Un intérêt des machines à absorption dans le cas d'un fonctionnement en mini-reseau comparativement à des solutions à compression et de faibles puissances.

### **2.3.2. Autres bilans de fonctionnement possible**

Les leviers ou les évolutions tarifaires qui semblent avoir un intérêt pour équilibrer les bilans de fonctionnement sont les suivants :

- Baisse du prix d'achat de la chaleur été UIOM servant à la production frigorifique :
  - 7 €/MWh
  - 0 €/MWh
- Baisse du coût de l'eau : l'utilisation de la nappe phréatique
- Augmentation de la tarification d'électricité (+100%)

### 2.3.2.1 Réduction du tarif chaleur été de 20€/MWh à 7€/MWh

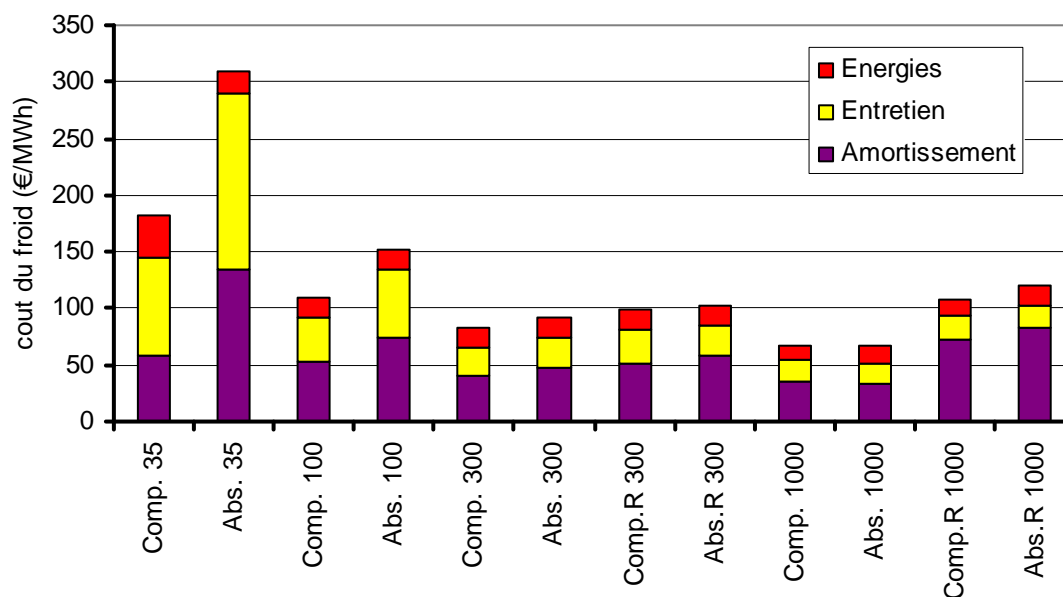


Figure 11: Synthèse des bilans de fonctionnement avec chaleur été à 7€/MWh

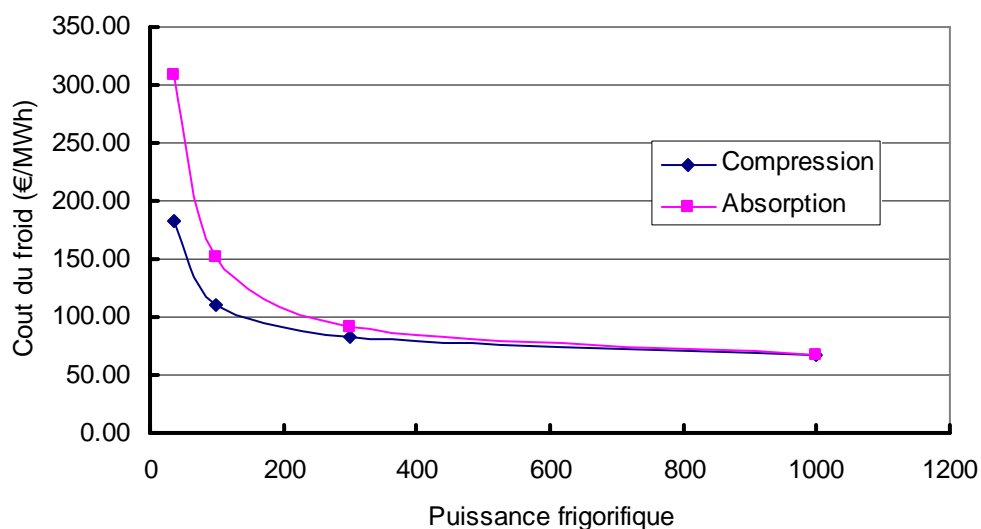


Figure 12: Comparaison des coûts de production du froid

La réduction du tarif d'été est intéressante pour les fortes puissances, où la solution absorption centralisée devient compétitive.

### 2.3.2.2 Réduction du tarif chaleur été de 20€/MWh à 0€/MWh

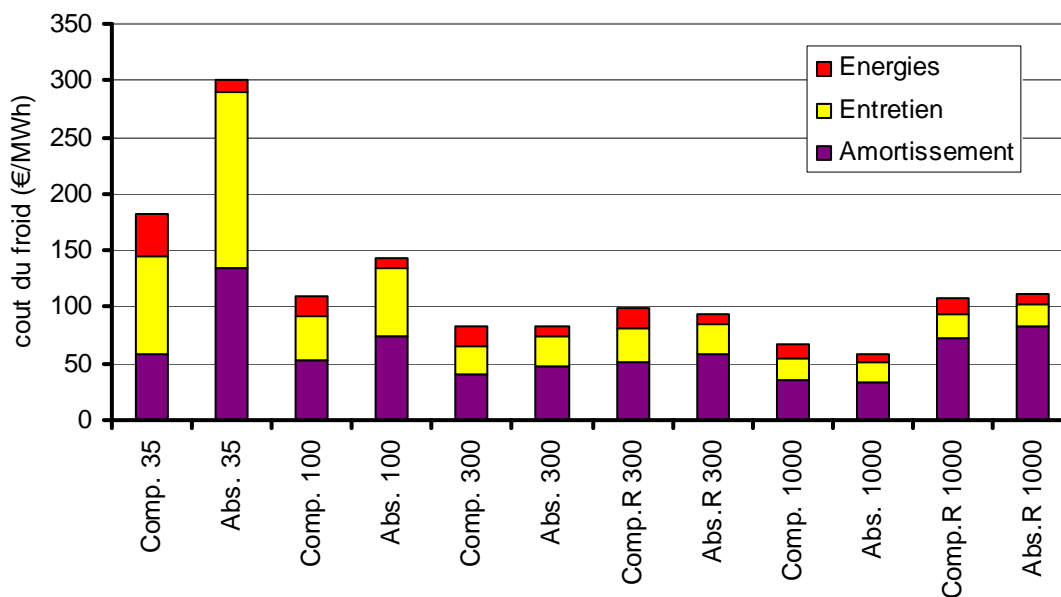


Figure 13: Synthèse des bilans de fonctionnement avec chaleur été gratuite

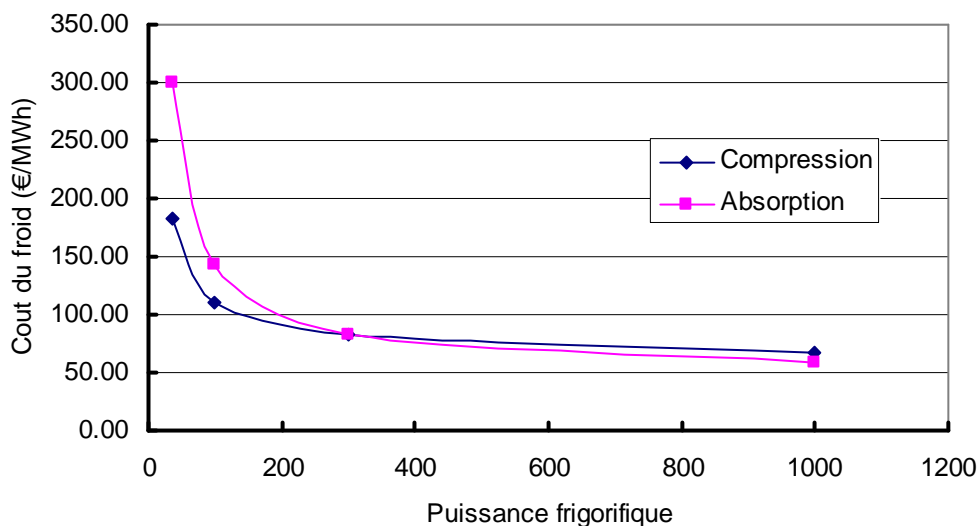


Figure 14: Comparaison des coûts de production du froid

La réduction du tarif d'été est intéressante pour les fortes puissances, où la solution absorption est compétitive face à la solution à compression de même puissance.

### 2.3.2.3 Pas de réduction du tarif chaleur été, eau gratuite

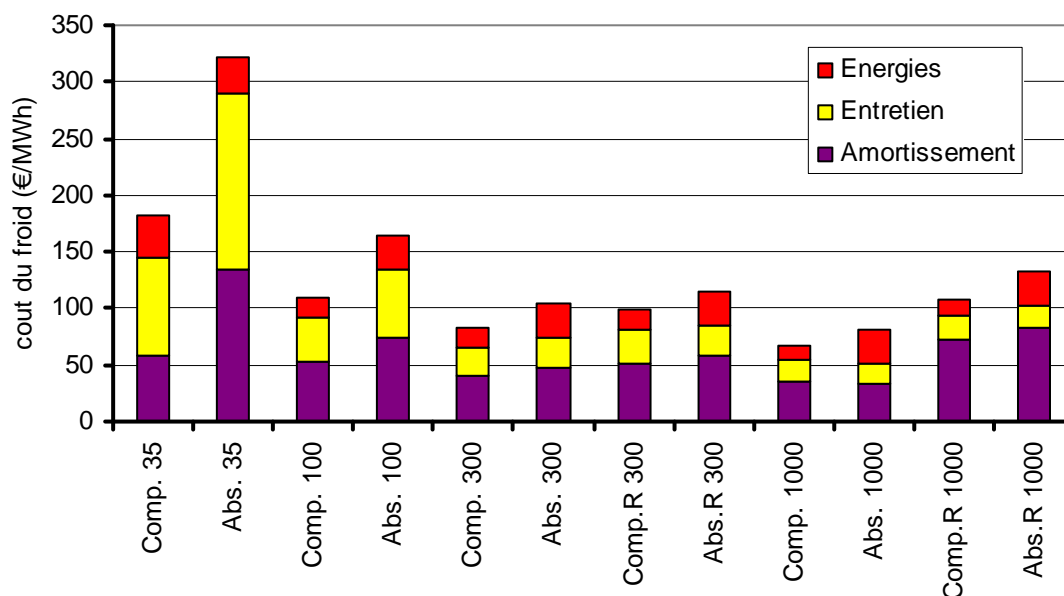


Figure 15: Synthèse des bilans de fonctionnement avec chaleur été à 7€/MWh, eau gratuite

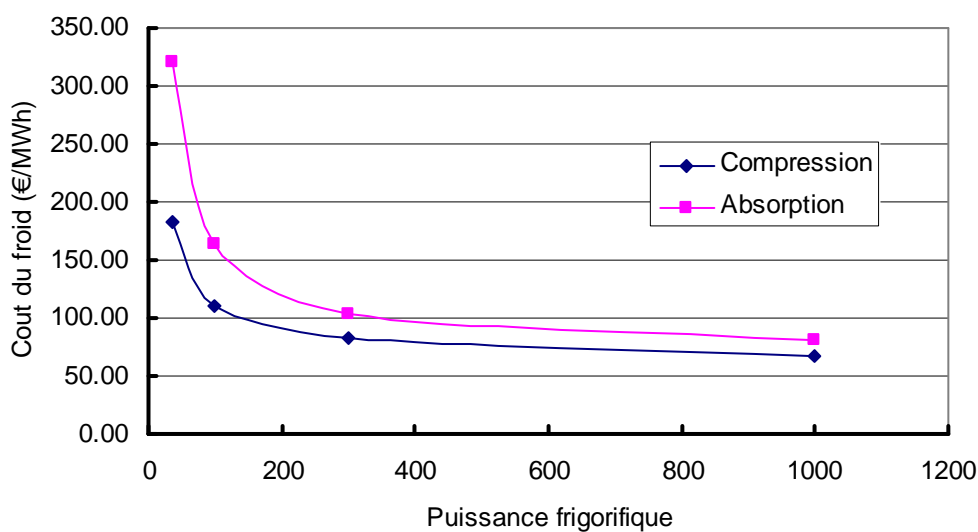


Figure 16: Comparaison des coûts de production du froid

La gratuité de l'eau a peu d'effet sur les coûts rendus de la production de froid.

2.3.2.4 Pas de réduction du tarif chaleur été, augmentation de l'électricité de 100%

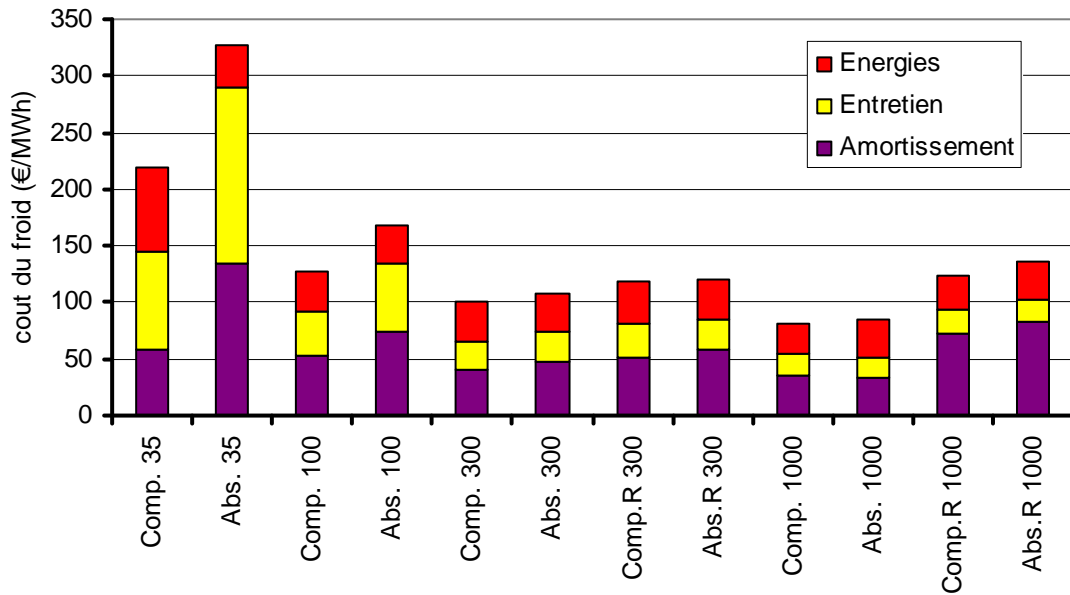


Figure 17: Synthèse des bilans de fonctionnement avec chaleur été gratuite et eau gratuite

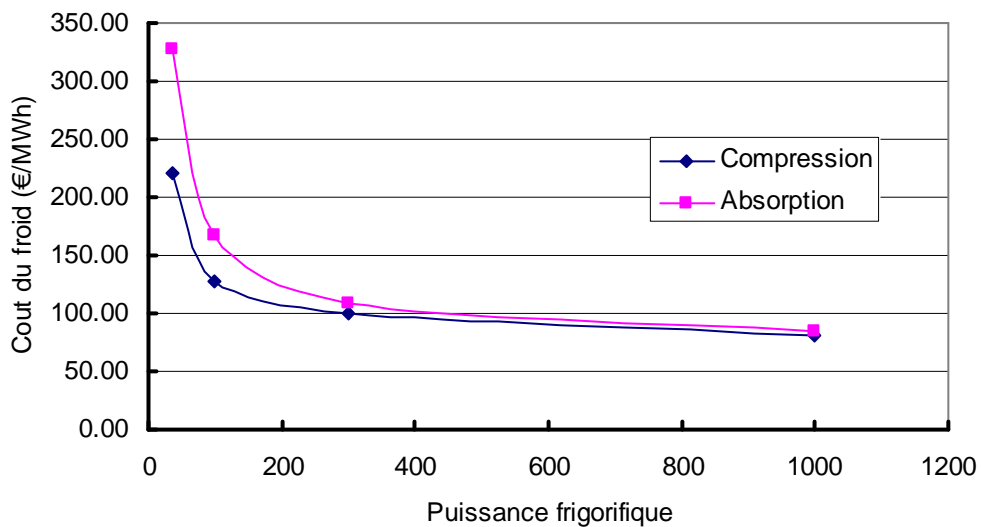


Figure 18: Comparaison des coûts de production du froid

Une augmentation du coût de l'électricité de 100% permet de rendre concurrentielle la solution à absorption à partir de 300kW, les charges énergies, entretien et investissement deviennent comparables.

### **3. Conclusion**

Les simulations réalisées selon différents paramètres montrent que les solutions à absorption peuvent être concurrentielles comparativement aux solutions à compression. Les principales conditions pour rendre la solution à absorption concurrentielle sont :

- Un coût réduit de la chaleur
- Une puissance frigorifique importante
- Une augmentation du coût de l'électricité

Il apparaît très difficile pour les solutions à absorption de faible puissance d'être concurrentielle face aux solutions à compression, principalement à cause des charges d'entretien et de maintenance incompressibles.