

République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen
Faculté des Sciences
Département d'Informatique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Mécanique

Option : Energétique

Thème

Etude prospective de la climatisation urbaine en Algérie

Réalisé par :

1. Mr.KALLOUCH Nedjm Eddine Ramzi.
2. Mr.BENACHENHOU Akram.

Présenté le septembre2020 devant le jury composé de :

- | | | | |
|----|---------------------|-----|-------------------|
| 1. | Mr AZZI Ahmed | MCA | Président de jury |
| 2. | Mr SEBBANE Omar | MCA | Examineur |
| 3. | Mr ALIANE Abdennour | MCB | Encadreur |

Année universitaire : 2019-2020

Remerciements

الحمد والثناء والشكر كله لله الواحد الأحد، الذي أعاننا على إتمام مشوارنا الدراسي المتّوجّج بهذه المذكرة المتواضعة، وأمدنا بالعلم والقوة والصّبر والرشد والهدى، وسخر لنا عباده الصّالحين. بكلّ حبّ إخلاص

نوبنا هذه المذكرة لوجه الله خالصة، آمليين ان يتقبّلها منّا

*Au terme de ce mémoire, nous tenant à remercier notre encadreur **Mr.ALIANE Abdel nour** pour ses conseils et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi pour son aide, son orientation et son précieux suivi durant la préparation de notre projet fin d'étude.*

Nous tenons à remercier aussi nos familles, nos amis, nos collègues et toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à la réussite de notre projet.

*Nous remercions sincèrement **Mr.AZZI Ahmed** et **Mr.SEBBANE Omar** D'avoir accepté examiner notre modeste travail.*

Dédicace

A mon cher père,

Ce travail dédié à l'âme de mon père, qui ma toujours poussé et motivé dans mes études. De la part de ton fils qui a toujours prié pour que tu sois fière de lui. Que dieu le tout puissant t'accueille dans son vaste paradis. Je t'aime papa.

A ma chère maman,

La lumière qui éclaire mon chemin, la source de ma force et de ma volonté, celle qui m'a donné goût à la vie et qui a fait de moi un homme dans ce monde, merci maman car tu n'as jamais cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Puisse dieu le plus haut vous accorder santé, bonheur et longue vie.

Papa, maman, rien au monde ne vaut vos efforts fournis pour mon bien être et pour mon éducation, ce travail est le plus petit cadeau que je peux vous offrir, je vous aime énormément.

A ma sœur et mon frère,

Pour leur amour et leur soutien. Que dieu vous protège et vous offre un avenir plein de réussite.

A mon Akram, un frère avant d'être mon binôme, je tiens à te remercier pour ton soutien moral, ta compréhension et pour les bons moments qu'on a passé ensemble lors de notre chemin universitaire.

NedjmEddine Ramzi

Dédicace

Je dédie ce travail

a ma famille, elle qui ma doté d'une éducation digne,

Son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui :

*Particulièrement a mon précieux offre du dieu a la femme qui souffert sans me laisser souffrir ,qui n'a jamais dit non a mes exigences .Ton affection me couvre , ta bienveillance me guide et ta présence a mes cotés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles. **mon adorable mère.***

A mon cher père

Mon support dans ma vie tu as toujours été a mes coté pour me soutenir et m'encourager, qui ma appris m'a supporté et ma dirigé vers la gloire . Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mon ami qui est mon frère

*A tous les moments d'enfance passés avec toi mon frère **Walid**, en gage de ma profonde estime pour l'aide que tu m'as apporté. Tu m'as soutenu, réconforté et encouragé. Puissent nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.*

*Sans oublier mon binôme **Ramzi** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

Akram

Table des matières

Résumé.....	8
Liste des figures	10
Liste des tableaux.....	12
Abréviations.....	13
Nomenclature	16
Introduction générale.....	19
Chapitre I : La climatisation urbaine : état de l’art.	
I. Historique	22
II. Synthèse bibliographique sur l’état de l’art de la climatisation urbaine.....	24
III. Quelques chiffres indicateurs :	27
IV. Prolifération des systèmes de climatisation conventionnelle en Algérie et leur impact économique environnemental :.....	30
IV.1. Prolifération des climatiseurs conventionnels.....	30
IV.2. Impacts économiques et environnementaux	31
IV.3. La perspective de la mise en œuvre de la climatisation urbaine en Algérie	33
IV.4. Les avantages de la climatisation urbaine	33
V. Aperçu technologique d'un système de refroidissement urbain typique	34
V.1. Principales composantes du système	34
V.2. Réfrigérants	36
V.3. Configurations des centrales.....	37
V.3.1. Configurations des refroidisseurs - en parallèle et en série	37
V.3.2. Configurations de pompage	38
V.4. Systèmes de distribution d'eau réfrigérée	39

V.5. Construire des interconnexions	39
---	----

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

I. Les méthodes de la climatisation urbaine actuelles et les sources d'énergie nécessaires pour sa réalisation	42
I.1. Les méthodes de la climatisation urbaine actuelles	42
I.2. sources d'énergie	43
I.2.1. Les polluants comme sources d'énergie.....	43
I.2.1.1. Résidus de scierie ou sciure	43
I.2.1.2. Déchets solides urbains	44
I.2.2. Energies gaspillées.....	46
I.2.2.1. Récupération de la chaleur des sources à haute température.....	47
I.2.2.2. Récupération de chaleur à partir de sources à basse température.....	48
I.2.2.3. Récupération de la chaleur des eaux usées	49
I.2.2.4. Gaz de décharge	50
I.2.2.5. Digestion anaérobie.....	50
II . Les méthodes utilisant les ressources renouvelables.....	51
II.1. L'énergie solaire	51
II.1.1 introduction.....	51
II.1.2 Énergie solaire thermique.....	52
II.1.3. Aperçu technologique des centrales solaires thermiques pour chauffage urbain.....	53
II.2. Energie géothermique	56
II.2.1 introduction.....	56

II.2.2. Géothermie	56
II.2.3. Énergie géothermique profonde.....	57
II.2.4. Utilisation et installation.....	58
II.3. Biomasse	60
II.3.1. Introduction	60
II.3.2. L'énergie biomasse	60
II.3.3. Principe de fonctionnement.....	61
III. Exemples de projets énergétiques.....	66
III.1 Le projet énergétique d'Aurigny 5	66
III.2 Le projet de Lonsdale's DH	67
III.3 Système énergétique communautaire de Revelstoke.....	68
IV. Tendances futures.....	69
 Chapitre III : Etude comparative entre une machine à absorption et une machine conventionnelle dans le cadre de la climatisation urbaine.	
I. Introduction.....	73
II. Modélisation thermodynamique d'une installation à absorption à simple effet.....	73
III. Bilan massique et énergétique.....	75
IV. Etude comparative entre une installation à absorption et une machine conventionnelle à compression de vapeur	77
V. Influence de la performance du système conventionnel sur le coût et les dégagements de CO ₂	79
Conclusion générale.....	82
Références.....	83

Résumé

La climatisation conventionnelle a été bénéfique dans plusieurs domaines, et a facilité la vie quotidienne des individus, mais comme toute invention, elle a ses limites et ses inconvénients. Le coût de la consommation d'énergie et la pollution de l'environnement ont fait partie de l'apparition de la climatisation urbaine.

Ce document présente la climatisation urbaine comme nouvelle technologie, qui sera plus efficace et économe. Elle se base essentiellement sur des méthodes qui s'appuient sur les énergies renouvelables, en la rendant moins polluante. Cette innovation apportera des solutions et de nombreux changements dans l'architecture et la conception des habitats.

Dans notre mémoire nous avons fait une étude comparative entre une machine à absorption et une machine conventionnelle dans le cadre de la climatisation urbaine, observer les résultats de chacune et déterminer la meilleure solution en termes de capacité de refroidissement, puissance consommée et coût de fonctionnement.

Abstract

Conventional air conditioning has been beneficial in several areas and has made everyday life easier for individuals, but like any invention, it has its limitations and inconvenience. The cost of energy consumption and environmental pollution have been part of it. Then urban air conditioning began to appear.

This document presents urban air conditioning, as a new technology that will be more efficient and economical. It is essentially based on methods that rely on renewable energies, making it less polluting. This innovation will bring solutions and many changes in the architecture and design of habitats.

In our brief we made a comparative study between an absorption machine and a conventional machine in the context of urban air conditioning, observe the results of each and determine the best solution in terms of cooling capacity, power consumed and operating cost.

ملخص

لقد كان تكييف الهواء التقليدي مفيداً في العديد من المجالات وجعل الحياة اليومية أسهل للأفراد، ولكن مثل أي اختراع، فإن له حدوده وعيوبه. كانت تكلفة استهلاك الطاقة والتلوث البيئي جزءاً منها. ومن هنا ظهر تكييف الهواء في المناطق الحضرية.

يقدم هذا المشروع تكييف الهواء في المناطق الحضرية باعتباره تقنية جديدة ستكون أكثر كفاءة واقتصادية. يعتمد بشكل أساسي على الأساليب التي تعتمد على الطاقات المتجددة، مما يجعلها أقل تلويثاً. سيأتي هذا الابتكار بحلول والعديد من التغييرات في هندسة وتصميم المنازل.

قمنا في مذكرتنا بإجراء دراسة مقارنة بين آلة امتصاص وآلة تقليدية في سياق تكييف الهواء الحضري، ومراقبة نتائج كل منها وتحديد أفضل حل من حيث سعة التبريد والطاقة المستهلكة وتكلفة التشغيل.

Mots clés :

Climatisation urbaine, Machine à absorption, Climatisation conventionnelle , énergies renouvelables , Système énergétique, coefficient de performance, climatisation en algérie.

Listes des figures

CHAPITRE I

- Figure I.1** Croissance du refroidissement urbain en Amérique du Nord.....
- Figure I.2** : Croissance de la climatisation urbaine dans le monde, sauf en Amérique du Nord.
.....24
- Figure I.3** : Évolution du parc installé des climatiseurs au Maghreb.
- Figure I.4** : Évolution du marché de la climatisation en Algérie, au Maroc et en Tunisie.....
- Figure I.5** : Ventes de climatiseurs dans les pays du Maghreb en 2013.....
- Figure I.6** : Répartition du marché des climatiseurs individuels par niveau de puissance dans les pays du Maghreb en 2013.....
- Figure I.7** : Les quatre niveaux des fuites des gaz réfrigérants.....
- Figure I.8** : Composants de base d'un système de refroidissement urbain.....
- Figure I.9** : Refroidisseurs parallèles en configuration de pompage primaire-secondaire.....
- Figure I.10** : Refroidisseurs en série en configuration de pompage primaire à débit variable...

CHAPITRE II

- Figure II.1:** Rendement des capteurs solaires.....
- Figure II.2** : Intégration centrale et décentralisée d'une centrale solaire thermique dans un système de chauffage domestique.
- Figure II.3** : Variation de la température du sol en fonction de la profondeur.....
- Figure II.4:** Système de refroidissement - Effet de réfrigération.....
- Figure II.5** : Système de refroidissement - LiBr concentré.....

Figure II.6 : Système de refroidissement - LiBr reconcentré.....

Figure II.7 : Système de refroidissement - Réfrigérant liquide.....

Figure II.8: Système de refroidissement - Refroidisseur à absorption de vapeur à effet unique.....

CHAPITRE III

Figure III.1 : Points figuratifs d'un système de réfrigération à absorption.....

Figure III.2 : Influence des quantités de chaleur mises en jeu.

Figure III.3: Influence de la température de rejet de chaleur sur le COP et la capacité frigorifique.

Figure III.4 : Influence du COP_c sur le coût et les dégagements de CO₂.

Figure III.5 : Comparaison entre la puissance frigorifique et de génération.

Figure III.6 : Evolution du coût et des dégagements de CO₂ en fonction de la température de génération.

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : la répartition des pays en quatre groupes en fonction de l'état de développement du DHC.....

Tableau I.2 : principaux obstacles rencontrés par la DHC par catégorie de pays.....

Tableau I.3 : Informations sur le PRP et le PDO des réfrigérants.

Chapitre II

Tableau II.1 : Pouvoir calorifique des déchets municipaux.....

Tableau II.2 : Technologies d'élimination des déchets municipaux.....

Tableau II.3 : Rendement des capteurs solaires.....

Liste des abréviations

A

A : Absorbeur.

AIE : Agence internationale de l'énergie.

C

C : Condenseur.

CCG : Conseil de coopération du Golfe.

CHP : La production combinée de chaleur et d'électricité.

D

DA : Digestion anaérobie.

DC : District cooling.

DCS : District cooling system.

DE : District énergie.

DH : District Heating.

DHC : District Heating and cooling.

E

E : Evaporateur.

EE: Efficacité énergétique.

ETS: Stations de transfert d'énergie.

G

G : Générateur.

H

HCFC-123 : Hydrochlorfluorocarbone.

HFC-134a : Hydro fluorocarbone.

HFO-1234yf :Tétrafluoropropène.

L

LEC: Lonsdale Energy Corporation.

LiBr : Bromure de lithium.

P

PACO :Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone

PNUE :Nations unies Programme environnemental.

PRP :Potentiel de réchauffement climatique.

R

. R-717 : L'ammoniac.

R-744 : Dioxyde de carbone.

S

SHX : Echangeur intermédiaire.

T

TES : Stockage d'énergie thermique.

TV : Vanne de détente.

U

UE : Union européen.

V

VAN : Valeur actuelle nette.

Nomenclature

Cop : Coefficient de performance.

\dot{m} : Débit massique [kg/s].

x : Titre.

h : Enthalpie [kJ/kg]

$DTLM$: Différence de température logarithmique moyenne [k].

T : Température [°C].

ϵ_{SHX} : Efficacité de l'échangeur intermédiaire.

\dot{W}_{SP} : Puissance consommée par la pompe de solution [kw].

V : Volume massique [m³/kg].

P : Pression [kPa].

η_{SP} : Rendement de la pompe de solution.

Q_e : puissance frigorifique [kw].

Q_d : puissance de génération [kw].

$\dot{W}_{conventional}$: Puissance de la machine conventionnel [kw].

$COP_{conventional}$: Coefficient de performance de la machine conventionnel.

C_{global} : coût global [dinar].

C_{kWh} : coût par kwh [dinar/kwh].

t : temps [s].

M_{CO_2} : Masse molaire du CO_2 [g/mol].

M_{uCO_2} : Masse molaire du CO_2 par KWH .

Introduction générale

Introduction générale

Les estimations de la consommation énergétique mondiale de 2003 à 2030 indiquent une augmentation d'environ 71% [1]. Les taux sans cesse croissants de la démographie, du développement économique et de la consommation d'énergie par habitant constituent la force majeure entraînant l'augmentation de la demande d'énergie pouvant atteindre 35% de 2010 à 2035 selon l'Agence Internationale de l'Energie [2].

Plus que jamais, il y a un consensus général parmi la communauté scientifique indiquant que si les activités humaines se poursuivent avec la même cadence, la température moyenne de la surface de la terre augmenterait de 1.4 à 5.8 °C au cours de la période 1990-2100 [3] et empirera les problèmes environnementaux qui sont déjà responsables de catastrophes à l'échelle planétaire, et ce malgré les mesures prises par la communauté internationale pour contrecarrer le processus.

Parmi ces mesures, le Protocole de Kyoto est un accord international en vertu duquel les pays industrialisés devraient réduire leurs émissions collectives de gaz à effet de serre de 5,2% par rapport à celles de l'année 1990. Surtout en ce qui concerne la réduction du dioxyde de carbone, qui est un sous-produit inévitable des activités industrielles [4].

Allant de pair avec le réchauffement de la planète et les changements climatiques, les demandes en matière de climatisation et réfrigération continuent de croître en raison de l'amélioration du niveau de vie en ce qui concerne les exigences de confort thermique des occupants, de l'augmentation des charges thermiques qui sont tributaires des caractéristiques des bâtiments et des tendances architecturales, comme l'augmentation du ratio de transparence de l'enveloppe des bâtiments [5].

La consommation d'énergie des systèmes de climatisation a été récemment estimée à 45% de l'ensemble des consommations des ménages et des bâtiments commerciaux [6]. La majorité de ces demandes est souvent satisfaite par des machines classiques à compression de vapeur électricivores conduisant à de fréquents pics de charge électrique pendant l'été, en particulier dans les régions à climat chaud et aride [7].

Bien qu'il existe de nombreuses tentatives pour améliorer l'efficacité des machines classiques en vue de réduire leur consommation énergétique, ces machines contribuent d'une manière significative, à l'encontre de la réglementation internationale, au réchauffement climatique et à l'appauvrissement de la couche d'ozone à cause de l'utilisation de réfrigérants nocifs [8].

Aujourd'hui, la thématique de l'efficacité énergétique, notamment dans le secteur du bâtiment, dispose d'une réelle opportunité de développement dans le monde. Le bâtiment devient soudainement un enjeu central de deux défis planétaires majeurs: le changement

Introduction générale

climatique et l'approvisionnement énergétique. Le secteur du bâtiment en Algérie (le résidentiel et le tertiaire) consomme plus de 40% du total de l'énergie, contre 46% en Europe, et de 19% des rejets de CO₂ dans l'atmosphère, contre 25% ailleurs. Ce secteur représente un potentiel énorme d'efficacité énergétique et de réduction des gaz à effet de serres. Pour ce bâtiment (secteur résidentiel et tertiaire), certes, le concepteur devra continuer à assurer l'abri et le confort de l'utilisateur, mais devra également faire en sorte que l'impact du bâtiment sur l'environnement soit minimisé [9].

Avec toute cette consommation d'énergie et les conséquences environnementales néfastes qu'elle engendre, le recours à la climatisation urbaine est primordial.

Un système de refroidissement urbain peut atteindre un taux d'efficacité spécialement sur le plan énergétique de 5 ou même 10 fois plus élevé (peut atteindre les 50%) qu'un système de refroidissement traditionnel grâce à une meilleure utilisation de l'énergie. Un réseau avec des refroidisseurs électriques pour le stockage du froid contribue aussi à réduire les pics de demande d'électricité pour le refroidissement dans une ville en déplaçant la production vers des périodes du jour ou de la nuit où il y a moins de fonctionnement sur le réseau électrique [10].

Donc le refroidissement urbain permettra de réduire les besoins annuels en électricité de 70 % par rapport aux solutions de refroidissement locales. La production d'électricité en Estonie est principalement basée sur le schiste bitumineux (80% en 2015). La diminution des besoins en électricité sera bénéfique pour l'environnement en réduisant les émissions de CO₂ de 70 % (6 000 tonnes/an) [11].

Le mémoire est constitué de 3 chapitres, nous allons tout d'abord introduire la climatisation urbaine dans le chapitre 1, donner un petit historique et présenter quelques figures (graphes) montrant son importance vis à vis des systèmes de climatisation conventionnelles notamment dans la consommation d'énergie.

Nous enchainons ensuite dans le chapitre 2 par présenter les méthodes de la climatisation urbaine en définissant les sources d'énergies renouvelable nécessaires pour sa réalisation, tout en donnant des comparatives sur des cas réels.

Dans le chapitre 3, nous avons faits une Etude comparative entre une installation à absorption et une machine conventionnelle à compression de vapeur , analysé les résultats de chacune et déterminer la meilleure solution en terme de capacité de refroidissement ,puissance consommée et coût de fonctionnement .

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

*Chapitre I : La
climatisation : état de
l'art.*

I. Historique :

Le chauffage urbain n'est pas une idée nouvelle. Elle remonte à l'Empire romain, lorsque de nombreux bâtiments étaient chauffés par des hypocaustes. Auparavant, des incubateurs artificiels étaient utilisés dans l'Égypte ancienne par les prêtres, et ce savoir a été utilisé par G. DELLA PORTA pour faire des incubateurs à Naples, en Italie, en 1588.

Il a été rapporté que le premier système de chauffage urbain commercial reconnu est apparu il y a 140 ans à Lockport, New York, en 1877. La nouvelle technologie s'est répandue, et au cours des dix années suivantes, une cinquantaine de nouveaux systèmes ont été installés.

Le refroidissement urbain a été introduit à Hartford, dans le Connecticut, en 1963 par la compagnie de gaz naturel du Connecticut utilisera le gaz naturel pour la climatisation.

Le refroidissement est disponible depuis une période beaucoup plus courte, environ 50 ans [12].

Le refroidissement urbain a bénéficié des améliorations des technologies qui ont suscité un regain d'intérêt en tant que technologie importante pour la fourniture de froid tels que :

- Amélioration de l'efficacité des nouveaux refroidisseurs.
- Amélioration de l'efficacité du pompage des systèmes de distribution.
- Des tuyaux mieux préfabriqués et pré-isolés, adaptés à l'enfouissement direct, donc des systèmes de distribution moins coûteux.
- Importance accrue des systèmes de cogénération à haute performance thermique l'efficacité (70%-85%).
- Importance accrue du tri génération, la production simultanée de chauffage, de refroidissement et d'énergie électrique.
- Amélioration du développement des grandes installations thermiques à eau glacée stratifiée réservoirs de stockage.

L'Asie et le Moyen-Orient montrent un intérêt croissant pour le refroidissement urbain, en particulier dans la région du Golfe, où il a connu une croissance exponentielle depuis les années 1990.

Les pays du Conseil de coopération du Golfe (CCG) s'attendent à ce que les besoins en matière de capacité de refroidissement tripler entre 2010 et 2030 [13].

Les États-Unis sont les pionniers du chauffage et du refroidissement urbains et ont donné le ton depuis de nombreuses années avec des technologies innovantes. La **Figure I.1** illustre la Croissance du refroidissement urbain en Amérique du Nord .

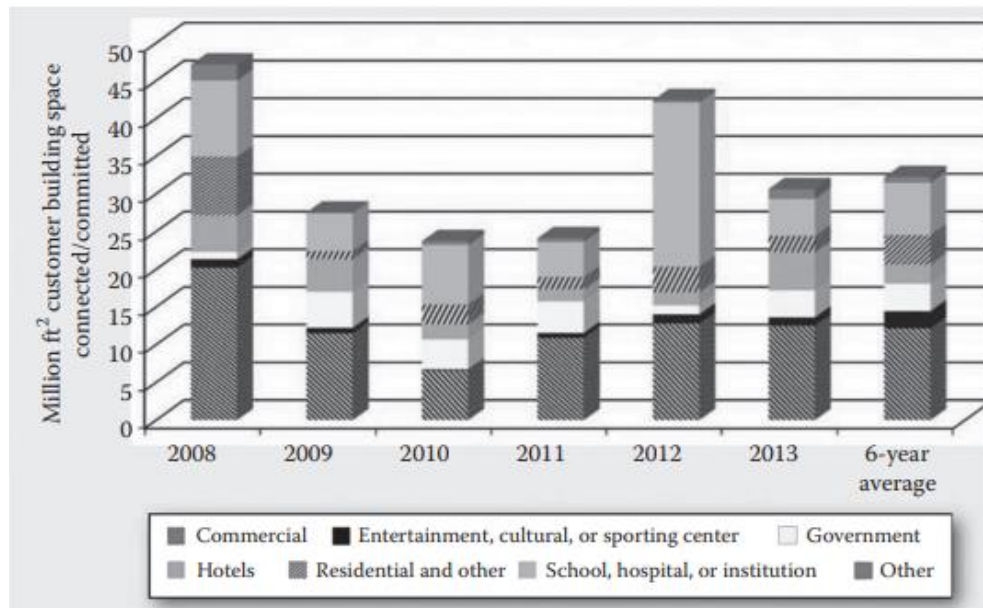


Figure I.2 : Croissance du refroidissement urbain en Amérique du Nord. (Tiré de Tredinnick, S., et al.ASHRAE Journal, 2015).

Source : [heat transfer (Boca Raton Fla.)]

Le Canada a récemment adopté des systèmes de chauffage et de refroidissement urbain dans quelque 130 projets. En Chine et en Corée du Sud, il existe de nombreux grands projets de refroidissement urbain et DC est toujours une industrie en pleine croissance. L'Inde étudie la question du refroidissement urbain et envisage de l'adopter dans cinq de ses grandes villes avec l'aide des Nations unies Programme environnemental, PNUE. En Europe du Nord, la Suède est un pionnier de la chauffage et le refroidissement urbains, où l'on utilise à la fois des refroidisseurs électriques et à absorption.

Le Danemark et la Finlande exploitent des systèmes de chauffage et de refroidissement urbains. Les deux grands La Grande-Bretagne et l'Allemagne ont utilisé le chauffage et le

refroidissement urbains dans de nombreux projets. Le **Figure I.3** illustre la Croissance de la climatisation urbaine dans le monde, sauf en Amérique du Nord.

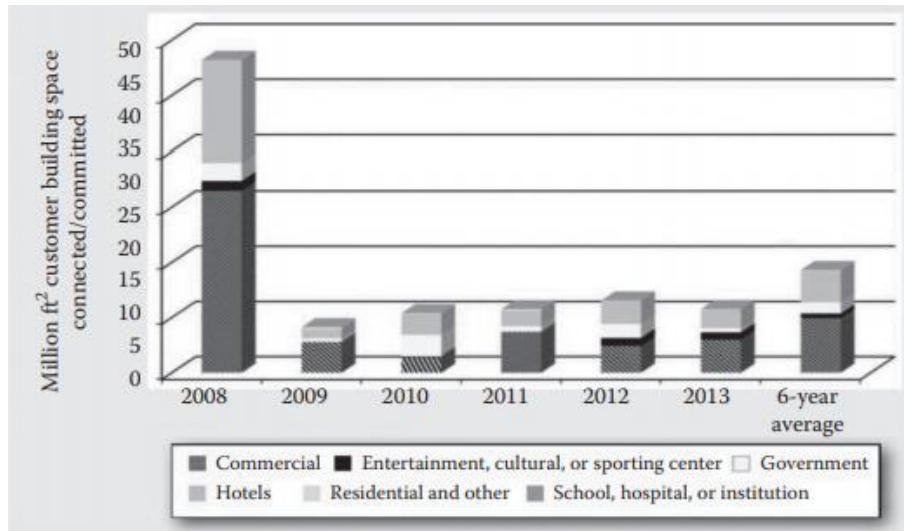


Figure I.4 : Croissance de la climatisation urbaine dans le monde, sauf en Amérique du Nord. (DeTredinnick, S., et al. ASHRAE Journal, 2015).

Source: [heat transfer (Boca Raton Fla.)]

Le refroidissement urbain a un avenir prometteur et fait désormais partie des solutions acceptées pour relever les défis futurs auxquels le monde est confronté, en offrant des solutions efficaces, écologiques et durables [14].

II. Synthèse bibliographique sur l'état de l'art de la climatisation urbaine :

Le statut du chauffage et du refroidissement urbains (DHC) avec la production combinée de chaleur et d'électricité (CHP) varie considérablement d'un pays à l'autre, de sorte que les enseignements tirés dans un pays peuvent être utiles pour un autre. Les pays sont à des stades très différents de développement des centres de soins de santé primaires, comme le montrent les exemples suivants **tableau I.1** Rien qu'en Chine et en Russie, quelque 200 millions de personnes au total sont desservies par des systèmes de chauffage urbain (DH). Les principaux obstacles au développement des DHC ont été identifiés comme suit :

1. Le DHC est une entreprise locale dans laquelle la municipalité devrait être fortement impliquée, au moins au niveau début. Cependant, la mauvaise situation financière et le

Chapitre I : La climatisation urbaine : état de l'art.

manque d'expérience des municipalités en matière d'énergie empêchent souvent le développement des DHC (tous les pays concernés).

2. La législation ne considère pas les centrales de cogénération comme une mesure d'efficacité énergétique (EE) soutenu par les pouvoirs publics (États-Unis, Canada).

3. Les faibles possibilités de financement de la réhabilitation et du développement des centrales de cogénération et des centres de traitement des déchets empêchent la mise en place d'un système efficace de gestion des déchets. l'utilisation des infrastructures de base DH/CHP déjà existantes (Russie, Ukraine, Kazakhstan, les pays des Balkans).

Etat de développement	Pays
Les pays émergent	Canada et les états unis, Angleterre
Pays en expansion	Chine et la Corée du sud, l'Allemagne et l'Italie
Pays en consolidation	Australie, Danemark, Finlande, France, Suède
Les remise à neuf	Bosnie et Herzégovine, Croatie, Kazakhstan, Kosovo, macédoine, FYR, Russie, Serbie, Ukraine, Ouzbékistan, Bulgarie, Croatie, République tchèque, Estonie, Hongrie, Lettonie, Lituanie, Pologne, Roumanie, Slovénie, Slovaquie

Tableau I.1 : la répartition des pays en quatre groupes en fonction de l'état de développement du DHC.

4. La gestion holistique du développement intégral des centres de soins de santé primaires est compromise par le partage des responsabilités entre les différentes organisations clés (Chine, Russie, Ukraine, Kazakhstan).

5. Les tarifs forfaitaires de chauffage n'incitent ni l'entreprise de chauffage ni les clients à l'EE. Le site La facturation basée sur la consommation à partir de compteurs de chaleur et les tarifs à deux niveaux ne constituent pas un remède (Chine, Russie, Ukraine, Kazakhstan, pays des Balkans).

la cogénération dans les pays sélectionnés sont présentées dans le **tableau I.2** ont été résumées. Les indications sont générales et descriptives, par exemple, la "facturation basée sur la consommation" indique qu'il n'existe pas de telle pratique en Russie et La Chine.

Il existe en fait une facturation basée sur la consommation dans ces deux pays, mais il est rare et à un stade précoce. Plus de la moitié des plus grands systèmes de chauffage domestique se trouvent dans des économies en transition, et le reste sont en Europe occidentale, en Amérique du Nord et en Asie. La DH se développe rapidement en Asie (Chine), tandis que le refroidissement urbain (DC) se développe en Asie (Corée du Sud) et en Europe (Finlande, Suède). En Europe, il existe des exemples de réussite en matière de DH, que ce soit ils sont fortement réglementés (Danemark) ou laissés aux conditions du marché (Finlande), mais là sont également des défis (Ukraine). Les opportunités et les obstacles institutionnels auxquels se heurte le développement des centres de soins de santé primaires jouent un rôle important dans le processus de développement de ces centres. Rôle dans le monde comme moyen de lutte contre le changement climatique. Les facteurs institutionnels ont été qui a été récemment discuté et analysé dans les publications suivantes :

- ❖ Politiques et obstacles pour le DHC en dehors des pays de l'UE, Agence internationale de l'énergie (AIE) Programme de chauffage et de refroidissement urbains, également connu sous le nom d'annexe IX (2008-2011) projets de recherche Accord de mise en œuvre, "Chauffage et refroidissement urbains, y compris la Intégration de la production combinée de chaleur et d'électricité". L'étude préparée par A. Nuorkivi (chef d'équipe) et B. Kalkum, mars 2011.
- ❖ Projet Ecoheat4EU similaire au précédent mais couvrant plusieurs pays membres de l'UE et de manière plus approfondie.
- ❖ Cartes de pointage des pays CHP/DHC de l'AIE.
- ❖ "District Heating and cooling Country by Country", enquête 2011, Euroheat&Power.

Des obstacles institutionnels empêchent la concrétisation des caractéristiques énumérées ci-dessus. Le site des obstacles est lié aux lois et aux réglementations officielles, à l'insuffisance des incitations à l'investissement et même des subventions, mais elles sont différentes selon les pays et les stades de développement [15]. En utilisant les trois catégories de pays sélectionnés, les obstacles typiques peuvent être résumés comme le montre le **tableau I.2**.

<p><i>Emerging:</i> Canada and USA</p>	<p>National policies do not clearly support DHC development Financially and politically weak municipalities have restricted possibilities to support DHC development locally High investment costs with long pay back times do not attract private sector investors to DHC Residential private customers could not be attracted to DHC but only public and commercial ones</p>
<p><i>Expanding:</i> China and South Korea</p>	<p>China: inadequate incentives to EE are caused by lump sum billing China: outdated technical standards lead to suboptimal technical solutions (CHP heat extraction, group substations and secondary networks, etc.) South Korea: Zoning is used, but the building sector development mainly limits the annual expansion to 3–4%</p>
<p><i>Refurbishing:</i> Bosnia and Herzegovina, Croatia, Kazakhstan, Kosovo, Macedonia FYR, Russia, Serbia, Ukraine, and Uzbekistan</p>	<p>Tariffs may not cover all costs, which lead to subsidy systems and inadequate refurbishment activities Lump sum tariffs do not give incentives to the company and its customers to save energy Often poor management of DH companies hampers both refurbishment and optimal operation Overlapping and unclear rights and responsibilities of the owner and energy management hamper both refurbishment investments and optimal operation Outdated technical standards lead to suboptimal technical solutions: over-sizing, redundant components, etc.</p>

tableau I.2: principaux obstacles rencontrés par la DHC par catégorie de pays.

Source: *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*, (Edited by Robin Wiltshire).

III. Quelques chiffres indicateurs :

D'après une étude menée, et en se référant aux enquêtes menées et aux statistiques provenant des différentes sources nationales, le parc installé comprend environ 9,7 millions de climatiseurs en Tunisie, en Algérie et au Maroc sur la période 2000-2013.

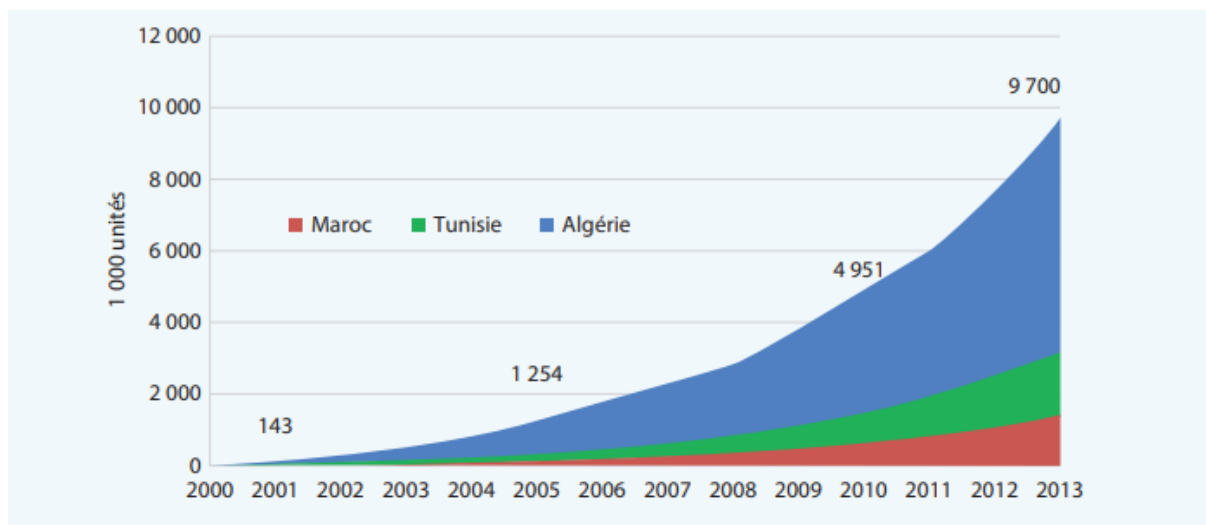


Figure I.3 : Évolution du parc installé des climatiseurs au Maghreb.

Le parc installé dans ces trois pays connaît une croissance fulgurante sur la période examinée avec un taux de croissance annuel moyen d'environ 48 % ou encore une multiplication du parc par 160 entre 2000 et 2013.

Les ventes annuelles, en Tunisie, en Algérie et au Maroc, ont dépassé 2 millions d'unités en 2013. Le marché ALGERIEN occupe la première place dans les ventes totales des trois pays, suivi par la Tunisie et le Maroc.

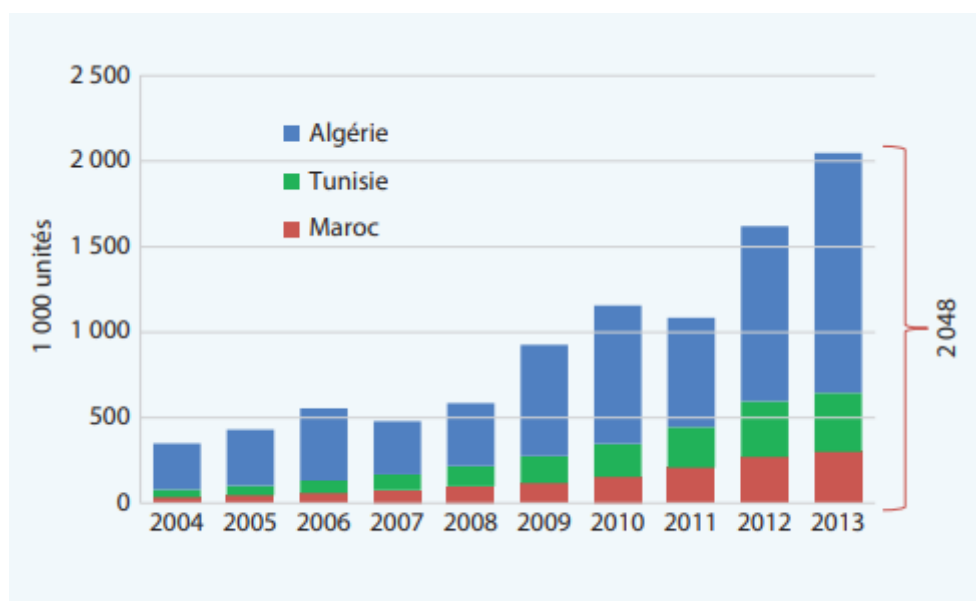


Figure I.4 Évolution du marché de la climatisation en Algérie, au Maroc et en Tunisie

En analysant les données des ventes on peut souligner que :

L'Algérie occupe la première position en termes de ventes annuelles avec 49% de part de marché, suivie par la Libye à 28%.

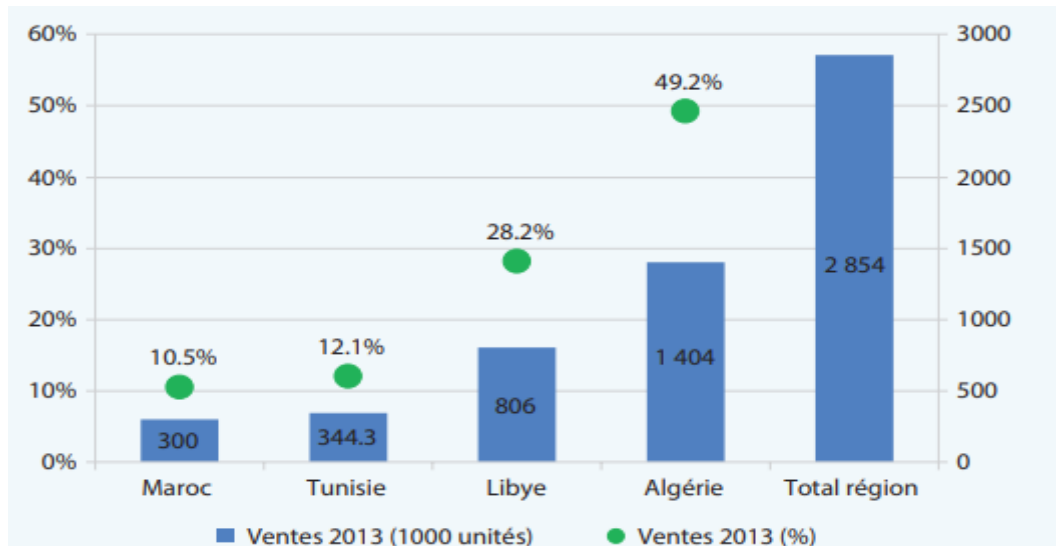


Figure I.5 : Ventes de climatiseurs dans les pays du Maghreb en 2013.

La puissance frigorifique de 12000 BTU comme cité précédemment est le plus commercialisé. En termes de puissance moyenne pondérée par le volume des ventes, ce modèle peut être utilisé comme modèle « témoin » pour caractériser le marché.

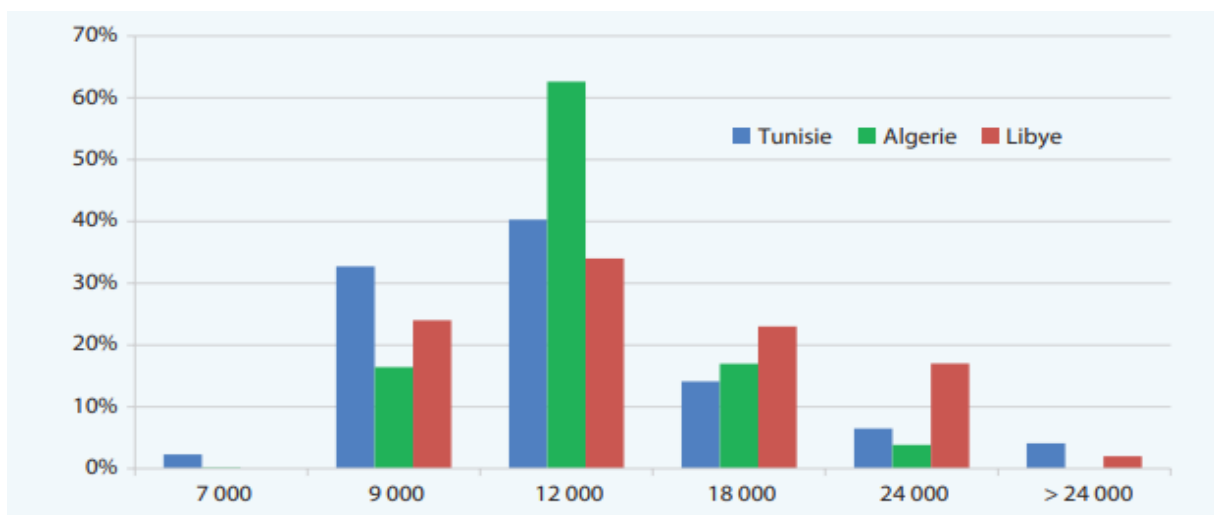


Figure I.6 : Répartition du marché des climatiseurs individuels par niveau de Puissance dans les pays du Maghreb en 2013.

Nous distinguons aussi que les marques les plus vendues notamment en Algérie proviennent des entreprises locales qui utilisent soit leurs propres marques soit celles de leurs fournisseurs de pièces détachées.

Certaines marques sont de renommée internationale (LG, SAMSUNG, MIDEA, TCL, CONTINENTAL EDISON,) alors que d'autres entreprises ont développé leurs propres marques (ENIEM, CONDOR, CRISTOR, IRI-SAT, SENTRAX, BYA ELECTRONIC) [16].

IV. Prolifération des systèmes de climatisation conventionnelle en Algérie et leur impact économique et environnemental :

IV.1. Prolifération des climatiseurs conventionnels :

La climatisation se révèle donc être un terme important dans l'équation qui caractérise la consommation électrique en Algérie dont l'usage doit indispensablement être contrôlé en cherchant des solutions adaptées au contexte du pays, d'autant que l'énergie est aujourd'hui un enjeu important qui influence la situation politique dans le monde.

Durant ces dernières années, la consommation de l'électricité en Algérie a été en forte progression, notamment dans le secteur résidentiel, à cause de la croissance démographique élevée, l'amélioration du niveau de vie, et le phénomène de l'urbanisation qui est de plus en plus important. Cette tendance est appelée à se poursuivre pour les années à venir, ce qui conduira à des contraintes technico économiques fortes, en terme d'infrastructures de production et de développement de réseaux de distribution électrique (Ministère d'énergie, Algérie).

En Algérie , les équipements de climatisation sont importés majoritairement de Chine ou assemblés localement et ne font l'objet d'aucun contrôle de la performance énergétique, l'étiquette définissant la classe de la consommation qui figure sur ces machines est fournie par le fabricant sans qu'une vérification externe ne confirme l'exactitude de l'indice de performance affiché, ces faiseurs de chaud et de froid peuvent dans certains cas consommer une énergie significativement supérieure à celle des machines installées en Europe ayant une même puissance frigorifique, mais bien avant cela il y a lieu de s'intéresser aux facteurs qui prolongent le temps de l'utilisation de la climatisation, à commencer par les caractéristiques

thermiques des bâtiments puisque le comportement thermique est souvent laissé en dernier des priorités et même négligé dans certaines conceptions ; malheureusement, dans la majorité des bureaux d'études la conception d'un bâtiment ne tient compte que de l'architecte et ne fait pas l'objet d'un second avis d'un spécialiste de l'isolation thermique, or le bilan énergétique est directement influencé par l'orientation du bâtiment, les ouvertures, les caractéristiques thermiques des matériaux de construction, etc.

Le comportement de l'individu n'est pas à exclure du moment que les subventions de l'énergie par l'Etat ont fait que la facture électrique soit dans l'inconscient collectif des Algériens une charge légère devant la nourriture et les autres besoins par ignorance, manque d'intérêt, ou absence de conscience, beaucoup de personnes laissent la climatisation en marche dans un lieu inoccupé [17] .

IV.2. Impacts économiques et environnementaux :

Les impacts néfastes des fluides frigorigènes sur l'environnement ne sont plus à démontrer.

En effet, les émissions directes résultantes des fuites au niveau du circuit frigorigène, contribuent à la destruction de la couche d'ozone, aient des effets sur le réchauffement climatique et renforcent l'effet de serre.

Les fuites des gaz réfrigérants interviennent à quatre niveaux, comme indiqué dans le schéma suivant:

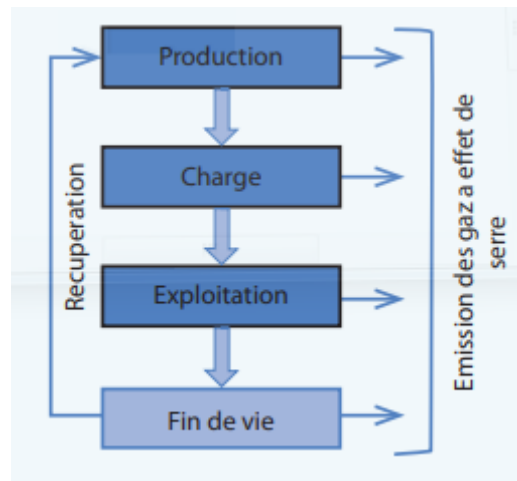


Figure I.7 : Les quatre niveaux des fuites des gaz réfrigérants.

Cet impact direct a également des conséquences sur la consommation d'énergie. Quand un climatiseur perd une partie du fluide qu'il contenait initialement, sa performance se dégrade se traduisant par une surconsommation énergétique.

L'importance de l'impact direct dépend de la nature du fluide frigorigène utilisé et du volume des fuites sur la durée de vie de l'appareil.

Les risques de fuites sont aussi plus importants pendant la mise en service ou la maintenance du climatiseur, ce qui confirme l'importance et la nécessité de la formation dans ce domaine.

Quant aux émissions indirectes, elles sont dues à la consommation d'énergie électrique par ces équipements, source d'impacts environnementaux indirects.

Nous ajoutons à cela Des impacts économiques qui se traduisent par l'efficacité énergétique dans la climatisation à plusieurs niveaux :

- Investissements évités dans de nouveaux moyens de production électrique.
- Impact sur la facture du consommateur.
- Impact sur la facture énergétique du pays.
- Poids de la subvention publique dans le secteur électrique.

Du à ses nombreux facteurs qui peuvent être un facteur directe ou indirecte sur l'environnement et l'économie, il faut impérativement prendre des mesures et des politiques adéquates.

Pour cela, l'Algérie a pris la mesure d'intégrer les énergies renouvelables, c'est-à-dire mettre en place Divers programmes et objectifs fixés pour l'intégration des énergies renouvelables dans le mix électrique [18].

IV.3. La perspective de la mise en œuvre de la climatisation urbaine en Algérie :

L'utilisation des énergies renouvelables à l'heure actuelle est une solution en vogue, mais elle n'a que peu d'intérêt si leur adoption n'est pas précédée par une étude technico-économique, la durée de l'investissement de l'équipement est prolongée par le coût de l'énergie fossile qui demeure relativement bas et ne laisse pas apparaître un avantage financier attrayant, d'où la nécessité de développer une industrie locale de taille pour les énergies renouvelables en vue de réduire le coût d'achat des équipements ainsi que les pièces accessoires.

En conclusion, la climatisation représente un important potentiel d'économie de l'énergie électrique en Algérie et la maîtrise de son utilisation importante ; à cet effet, quelques solutions pourraient réduire la consommation électrique comme la climatisation urbaine [19].

IV.4. Les avantages de la climatisation urbaine :

La climatisation urbaine présente de nombreux autres avantages par rapport aux autres systèmes de climatisation :

1. La valeur actuelle nette (VAN) d'un système de refroidissement urbain, sur sa durée de vie, se compare favorablement aux stations de refroidissement individuelles pour un même district.

2. Il utilise moins de refroidisseurs pour refroidir un certain quartier en raison de la diversité des charges.

3. Il utilise le stockage d'énergie thermique (TES), ce qui permet de calculer la charge de refroidissement moyenne de la station, et il aide à réduire les charges électriques de pointe, améliorant ainsi la consommation d'énergie.

4. Il réduit les émissions de carbone en raison de la réduction de la capacité installée et d'une meilleure efficacité des installations.

5. Il permet de libérer les dépenses d'investissement des propriétaires et des promoteurs.

6. Il offre une meilleure fiabilité et une meilleure sécurité de fonctionnement par rapport à la construction des installations de climatisation individuelles.

7. Il dispose d'une plus grande puissance de refroidissement redondante que les bâtiments individuels centraux électriques.

8. Il élimine la nécessité d'installer des stations de refroidissement à l'intérieur ou au-dessus des bâtiments, améliorant ainsi l'esthétique du bâtiment et libérant un espace qui peut être utilisé en location.

9. Il permet de réaliser des économies sur les coûts des câbles électriques distribués, des conduits et les transformateurs abaisseurs de tension, par rapport aux stations de bâtiment individuelles, ce qui se répercute positivement sur les coûts globaux d'installation électrique pour le développement [20].

V. Aperçu technologique d'un système de refroidissement urbain typique :

V.1. Principales composantes du système :

Comme tous les systèmes énergétiques de quartier, les DCS ont trois composantes principales :

l'installation de production d'eau réfrigérée (centrale), les conduites de distribution (réseau) les interconnexions des bâtiments (généralement appelées "stations de transfert d'énergie")(**Figure I.8**). Les principaux équipements de refroidissement, y compris les refroidisseurs, les pompes, le traitement chimique, Les commandes et les équipements de rejet de chaleur sont logés dans la centrale.

Chapitre I : La climatisation urbaine : état de l'art.

Il peut être une ou plusieurs technologies de refroidissement présentes dans l'installation centrale, en fonction du coût des services publics locaux (électricité et gaz naturel), ou la disponibilité de toute chaleur résiduelle (vapeur ou eau chaude) à utiliser comme conducteur principal.

Les refroidisseurs d'eau peuvent être classés comme soit par compression mécanique de la vapeur, soit par thermochimie (absorption avec du lithium le bromure comme réfrigérant).

Les technologies de refroidissement disponibles comprennent les systèmes centrifuges ou rotatifs machines à compression de vapeur à vis et absorption thermochimique d'eau chaude ou de vapeur des refroidisseurs. Les compresseurs centrifuges et à vis ont d'autres options quant à la conducteur, tel qu'un moteur électrique, une turbine à vapeur ou un moteur à gaz.

Souvent, il existe des synergies avec le refroidissement urbain et la cogénération de chaleur et d'électricité où la chaleur résiduelle du processus de combustion est utilisée comme moteur principal pour les refroidisseurs pendant la saison de refroidissement, afin d'augmenter l'efficacité de la cogénération de la saison et non Jetez la chaleur. Applications de la cogénération utilisant des moteurs à combustion interne alternatifs .

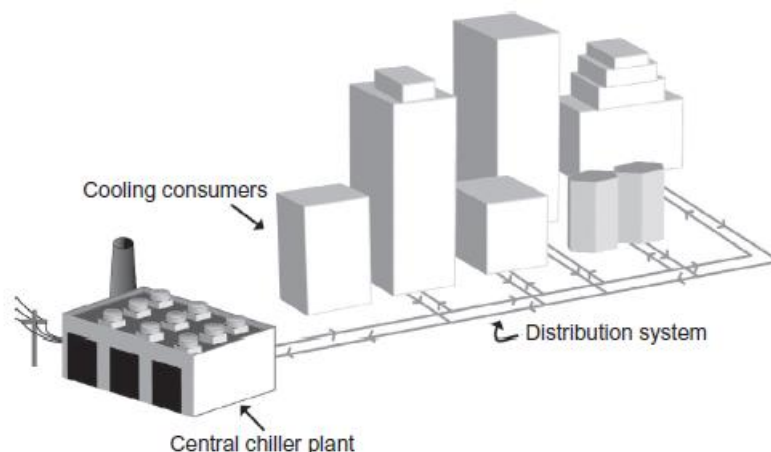


Figure I.8 : Composants de base d'un système de refroidissement urbain.

Source : S. Tredinnick, G. Phetteplace *Burns & McDonnell, Inc., Downers Grove, IL, USA; GWA Research LLC, Lyme, NH, USA.*

V.2. Réfrigérants :

Les refroidisseurs à compression de vapeur peuvent utiliser divers réfrigérants, mais Les réfrigérants les plus couramment utilisés pour les gros refroidisseurs (>500 tonnes) aux États-Unis sont HFC-134a (hydro fluorocarbone) et HCFC-123 (hydrochlorfluorocarbone). Dans le Nord Amérique, le HFC-134a n'a actuellement pas de date d'élimination progressive pour son utilisation dans les véhicules non automobiles la climatisation, mais le HCFC-123 a cessé progressivement la production de réfrigérant depuis 2004, et la production sera entièrement supprimée d'ici 2030, comme le dicte le Protocole.

De même, en 2020, il est interdit de fabriquer de nouveaux équipements utilisant HCFC-123.

Si le HFC-134a a un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (PACO) nul, il a un potentiel de réchauffement climatique (PRP) à 1430, ce qui a amené certains pays européens d'interdire, de taxer ou de commencer à supprimer progressivement son utilisation, ou du moins d'envisager de la supprimer progressivement. Par conséquent, il y a eu une "résurgence" de l'utilisation de l'ammoniac (R-717) et du dioxyde de carbone (R-744) comme réfrigérants utilisés dans le monde entier dans les équipements de refroidissement par compression de vapeur et des recherches plus poussées sur les réfrigérants à faible PRP, tels que le HFO-1234yf et d'autres qui pourraient remplacer le HFC-134a. Jusqu'à présent, aucune baisse de remplacement n'a été identifié pour le HCFC-123.

Le **tableau I.3** résume les valeurs du PRP et du PDO des substances les plus courantes.

Refrigerant	GWP	ODP
HFC-134a	1430	0
HCFC-123	77	0.02
Propane (R-290)	3.3	0
HFO-1234yf	4	0
CO ₂ (R-744)	1	0
Ammonia (R-717)	0	0

Tableau I.3 : Informations sur le PRP et le PDO des réfrigérants.

Source : US EPA (www.epa.gov).

V.3. Configurations des centrales :

La configuration de l'installation de refroidissement dépend d'un certain nombre de variables, telles que le type de refroidisseur, températures de l'eau réfrigérée, configuration du pompage, mode de fonctionnement des refroidisseurs (parallèle ou série), les caractéristiques de la charge (c'est-à-dire le renversement de la charge minimale à la charge maximale) et les exigences en matière de redondance. Une fois que chacun des paramètres est pris en compte, l'installation peut être configurée de manière logique.

V.3.1. Configurations des refroidisseurs - en parallèle et en série :

Souvent, les refroidisseurs sont raccordés en parallèle (voir la figure I.9, plus loin), où chaque unité les conditions d'entrée et de sortie de la production sont les mêmes, ce qui donne une configuration.

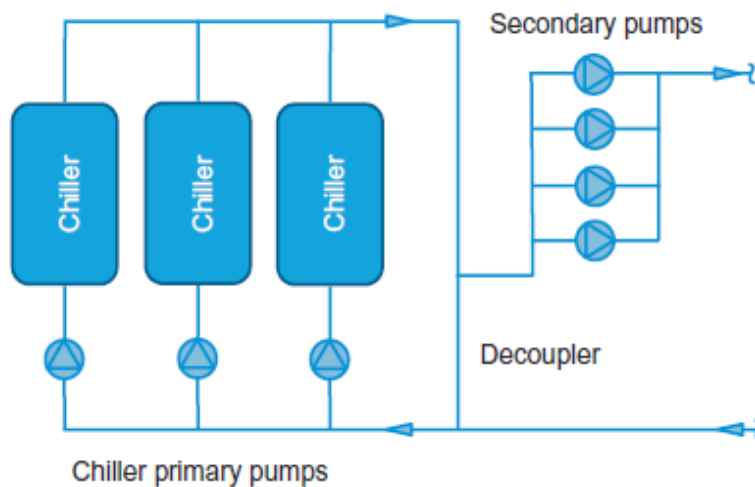


figure I.9: Refroidisseurs parallèles en configuration de pompage primaire-secondaire.

Source: S. Tredinnick*, G. Phetteplace *Burns & McDonnell, Inc., Downers Grove, IL, USA; GWA Research LLC, Lyme, NH, USA.

Si le système d'eau réfrigérée doit avoir un très grand différentiel de température (par exemple plus de 18 °F ou 10 °C), puis ils peuvent être raccordés en série (voir la figure I.10, plus loin) pour économiser l'énergie.

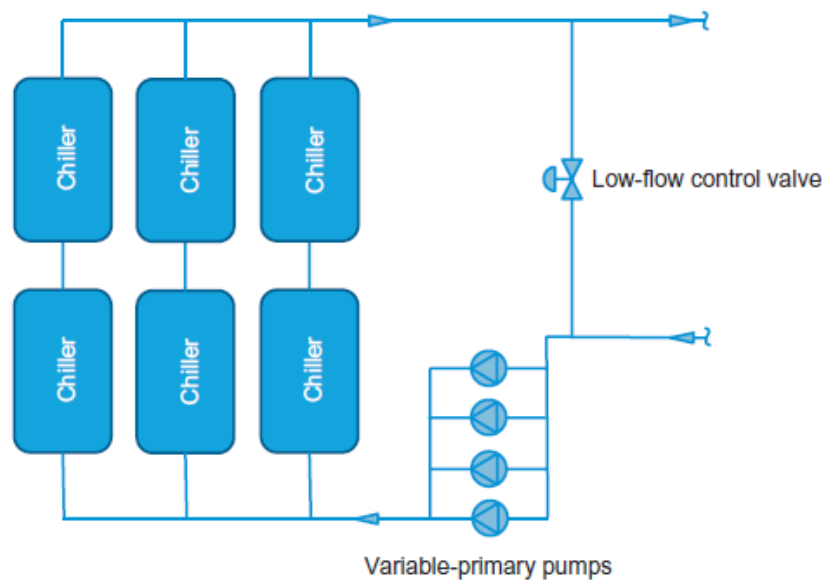


Figure I.10 : Refroidisseurs en série en configuration de pompage primaire à débit variable.

Source : S. Tredinnick*, G. Phetteplace *Burns & McDonnell, Inc., Downers Grove, IL, USA;
GWA Research LLC, Lyme, NH, USA.

Pour une installation à plusieurs refroidisseurs, une autre nuance consiste à raccorder les unités sur les évaporateurs et à contre-courant sur le condenseur, pour encore plus d'économies d'énergie, puisqu'il réduit encore plus la "portance" ou le "travail" du compresseur. La "levée" est définie comme la différence entre la température de l'eau à la sortie du condenseur et celle à la sortie de l'évaporateur.

V.3.2. Configurations de pompage :

Il existe plusieurs méthodes de pompage des installations de refroidissement.

Les paramètres de base pour faire la décision appropriée est le nombre de boucles et si elles sont à débit constant ou débit variable. À l'exception des petits systèmes d'eau réfrigérée, il n'y a pas de véritable avantage d'un débit constant, c'est pourquoi cette discussion sera axée sur le débit variable.

Le nombre de boucles de pompage dépend également de la taille du système. Il peut y avoir une boucle unique qui pompe les refroidisseurs vers le système de distribution et enfin

vers le client soit ce système peut être séparé en deux ou trois boucles découplées l'une de l'autre avec un tuyau de dérivation.

Généralement, les boucles sont dites "primaires", "secondaires", tertiaire", etc., la boucle primaire circulant dans les refroidisseurs, la boucle secondaire circulant dans refroidisseurs vers le client, puis le client fait circuler son propre système comme la boucle tertiaire.

V.4. Systèmes de distribution d'eau réfrigérée :

L'eau réfrigérée est normalement acheminée de la centrale vers les utilisateurs via un réseau d'égouts souterrains.

Le système de distribution ne doit pas être considéré comme une réflexion après coup, il représentera une fraction importante de l'investissement, et contrairement à l'installation frigorifique, une fois la tuyauterie est enterrée, l'accès est limité, et donc, la réparation/remplacement peut être très coûteux. De nombreux matériaux ont été utilisés pour la construction de la distribution d'eau réfrigérée.

V.5. Construire des interconnexions :

Il existe de nombreuses conditions pour le transfert de la garde de l'énergie thermique produite par le district fournisseur de froid et utilisé par le bâtiment du client, y compris les interconnexions des bâtiments et les stations de transfert d'énergie (ETS). Comme pour les interconnexions des bâtiments de DH, il existe deux variétés de base : les connexions directes et indirectes, et il existe plusieurs variantes de chacun. Un raccordement direct est le mieux décrit comme l'eau fournie par l'installation centrale est la même eau que celle utilisée dans le système de refroidissement du système de HVAC du bâtiment du client bobines. Une connexion indirecte utilise un échangeur de chaleur, généralement de type à plaques, qui sépare l'eau de l'installation centrale de celle du client. La sélection de l'un ou l'autre type de connexion est une combinaison de plusieurs facteurs, tels que les températures de conception du client, la hauteur du bâtiment du client et les restrictions de pression du système. Pour les

immeubles de grande hauteur Il n'est pas rare de disposer d'une connexion directe desservant les étages inférieurs et une liaison indirecte desservant les étages supérieurs [21].

Chapitre II :
Synthèse sur les
différentes méthode de
la climatisation urbaine

I . Les méthodes de la climatisation urbaine actuelles et les sources d'énergie nécessaires pour sa réalisation :

I.1. Les méthodes de la climatisation urbaine actuelles :

Fournir aux clients de l'énergie de chauffage et de refroidissement à partir de systèmes énergétiques de quartier contribue essentiellement à l'utilisation rationnelle de l'énergie et à la protection de l'environnement. Ces dernières années, l'utilisation du refroidissement urbain a été considérablement accrue dans certains pays. La fourniture d'énergie de refroidissement et de chauffage pour les districts urbains est généralement séparée. Alors qu'une partie du district est alimentée en gaz naturel où utilise des combustibles liquides à des fins de chauffage, l'autre partie peut être alimentée par la chaleur du réseau de chauffage urbain. Les systèmes de refroidissement sont généralement basés sur l'utilisation de l'énergie électrique et sont dans la plupart des cas de très petites unités. Dans ce cas, la capacité de refroidissement d'une telle unité ne couvre que les besoins d'un petit bâtiment, d'un bureau ou même d'un appartement, et non les besoins de refroidissement d'un district entier ou d'un groupe de bâtiments. Souvent, l'utilisation de technologies particulières est énergétiquement inefficace et non respectueuse de l'environnement. Il peut y avoir de nombreuses sources d'énergie différentes dans un même environnement. Il convient alors d'utiliser les technologies de refroidissement et de chauffage qui sont les plus acceptables d'un point de vue environnemental, technique et économique.

Le document présente des concepts de systèmes d'approvisionnement en énergie et examine leur efficacité énergétique. Les possibilités d'amélioration des systèmes existants sont soulignées.

Les orientations de développement des systèmes énergétiques dans les quartiers urbains sont présentées sur la base d'une analyse, des solutions permettant d'obtenir les meilleurs résultats sur le plan énergétique, économique et environnemental.

L'approvisionnement en énergie des consommateurs est essentiel pour assurer une conditions de vie des citoyens et de permettre la production dans l'industrie.

Les systèmes énergétiques de quartier fournissent l'offre complète au consommateurs avec différents types d'énergie, alors que les systèmes de chauffage urbain sont utilisés dans le monde entier depuis longtemps, les systèmes de refroidissement urbain sont pas encore

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

bien établie en Europe. Cependant, ils sont bien développés et utilisés depuis longtemps dans L'Amérique du Nord.

Ces refroidisseurs sont, dans la plupart des cas, refroidis à l'air et surdimensionnés pour des pièces qu'ils refroidissent, et ils utilisent souvent des réfrigérants nocifs. Il en résulte un taux pour surveiller la consommation d'énergie électrique, en particulier pendant les périodes de pointe de la demande de refroidissement. En revanche, pendant l'été, les systèmes de cogénération connaissent des problèmes avec une faible production de chaleur et d'électricité en raison faible consommation de chauffage urbain, alors qu'en hiver, la chaleur est utilisé pour le chauffage des bâtiments [22].

I.2. sources d'énergie :

I.2.1. Les polluants comme sources d'énergie :

Les systèmes énergétiques localisés créent des avantages tant environnementaux qu'économiques pour la communauté. Un système DE conçu pour accéder à une source d'énergie qui est normalement polluante génère des bénéfices qui sont obtenus par la simple vente de l'énergie propre et verte. L'investissement dans un tel système devient plus facile à justifier.

I.2.1.1. Résidus de scierie ou sciure :

En tant que sous-produit de l'industrie du bois, l'élimination de la sciure, des copeaux de rabotage et l'écorce peut souvent devenir un problème majeur. En raison de leurs qualités d'agglomération, l'élimination a souvent inclus le brûlage à ciel ouvert.

Sans une gestion adéquate, ces deux créent invariablement des problèmes d'émissions de particules pour le quartier.

La sciure elle-même peut être abrasive, acide et dans certains cas toxique. Les fluides concentrés provenant des eaux de ruissellement peuvent dégrader les eaux souterraines et créent des problèmes de santé. Cependant, la même sciure, une fois sèche, peut être une excellente source de combustible et elle est souvent disponible dans les quantités nécessaires pour un système communautaire.

Les propriétés granulaires de la sciure ont une caractéristique importante, car elles définissent le type de l'équipement et son coût, contrairement aux copeaux de bois, la

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

conception du système de manutention des matériaux et la grille du four doit faire l'objet d'une attention particulière, afin d'éviter des problèmes tels que les ponts de combustible humide dans les trémies de stockage sans fin d'alimentation.

Une autre option, mais plus coûteuse, serait la gazéification, où la sciure est réduite à un combustible gaz et transférées pour être brûlées ailleurs. La combustion et la gazéification nécessitent des équipements efficaces de contrôle des émissions et de balayage des particules, car les particules de carbone et la sciure non brûlée sont des questions cruciales pour la combustion de ce type de combustible.

I .2.1.2. Déchets solides urbains :

La combustion des déchets solides urbains pour fournir du chauffage a été pratiquée dans l'Europe depuis de nombreuses années bien qu'au Canada, il y ait eu une réticence à suivre le mouvement.

L'offre abondante de terrains pour les décharges suscite aujourd'hui l'inquiétude de l'opinion publique concernant les enjeux environnementaux. L'Amérique du Nord voit la réduction du nombre des sites adaptés, la notion de déchets solides en tant que source d'énergie est débattue à travers le pays.

Dans les situations où un programme de détournement des déchets est en vigueur et où le papier, les plastiques et les produits recyclables ont été supprimé, il faut reconnaître que la valeur combustible du reste est relativement faible. Une certaine quantité de matière à haut pouvoir calorifique est nécessaire pour maintenir le processus de combustion (voir **tableau II.1**).

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

Les déchets	Pouvoir calorifique (kJ/kg)
Alimentation et produits biologiques	1912
Plastique	20 144
Textiles	11 789
Papier et carton	6440
Cuir et caoutchouc	14 265
Bois	9310
Verre	-73
Amendes	2584

Tableau II.1 Pouvoir calorifique des déchets municipaux

Source: Energy Information Administration (2007).

La viabilité de l'utilisation des déchets solides municipaux nécessite un certain degré d'hétérogénéité dans le flux de déchets, et cela aura un impact sur les politiques et pratiques locales de réduction des déchets au sein de la communauté.

Par exemple, Les municipalités canadiennes ont la responsabilité de collecter les déchets uniquement pour le secteur résidentiel, en laissant le secteur commercial financer son propre programme d'élimination. Les déchets industriels sont également traités séparément.

Avec différents programmes de recyclage en cours dans les secteurs résidentiel, commercial, industriel, la composition de la communauté dictera la composition des déchets et la densité énergétique disponible et donc la technologie de conversion de l'énergie . Le **tableau II.2** illustre les technologies disponibles et leur demande comparative en carburant.

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

	Direct combustion	Digestion anaérobie	Gazéification conventionnelle	Pyrolyse
Coût du capital (en milliers de dollars par tonne)	300–450	125–250	300–500	300–450
Les coûts d'exploitation et d'entretien sont en (millions de dollars par an)	5–12.5	2.5–7.5	10–15	10–15
Production d'électricité (kWh/tonne)	550–700	50–250	400–600	200–500
Puissance thermique (kWh/tonne)	250–2500	55–275	250–2500	250–2500
Prétraitement nécessaire ?	Faible	Moyen	Moyen-élevé	élevé
État de la technologie	prouvée	prouvée	Démonstration	Démonstration

Tableau II.2 Technologies d'élimination des déchets municipaux.

Source: Natural Resources Canada (2012).

I.2.2. Energies gaspillées :

L'expression "énergie gaspillée" est un terme impropre : le terme correct est "ressource non utilisée" Il s'agit d'un terme générique qui décrit les flux d'énergie ou les matières combustibles qui sont normalement rejetés dans l'environnement et ignorés par la société en tant que sous-produits d'un autre processus, probablement l'une des sources d'énergie les plus couramment disponibles, et pourtant l'un des moins utilisés, la température de ces sources varie de celle des gaz de combustion de l'industrie de transformation à plus de 1000 °C

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

jusqu'à l'évacuation des flux de ventilation ou de réfrigération à 35 °C ou moins par exemple, les gaz à l'état de précombustion, comme les émissions provenant de la décomposition naturelle des déchets organiques.

I.2.2.1. Récupération de la chaleur des sources à haute température :

La récupération et la réutilisation de la chaleur des flux à haute température, tels que les gaz de combustion ou les gaz d'échappement industriels est une tâche que l'industrie elle-même devrait aborder avant de la proposer pour l'utilisation dans un réseau local d'E.D.

L'accès au flux d'énergie nécessite une compréhension de l'origine de la chaleur, peut-être d'un processus industriel, d'un courant de refroidissement, etc.

Un récent exercice de cartographie de l'énergie dans un certain nombre d'industries soutenant l'industrie pétrochimique canadienne a permis d'identifier des niveaux d'énergie importants qui pourraient être utilisés localement.

Le **tableau II.3** illustre le niveau des émissions thermiques et de gaz à effet de serre ainsi qu'une estimation du niveau équivalent de puissance qui pourrait être produit et les ménages qui pourrait être chauffée. Des questions, telles que la réticence de l'industrie à partager des informations sur sa consommation d'énergie, ont été débattues sur la base de connaissances industrielles, propriétaires, confidentielles, la connaissance, peuvent être traitées par l'utilisation d'un protocole de rapport commun, tel que développé récemment au Canada pour les industries pétrochimiques, Une initiative similaire en Europe examinée, à un niveau macroéconomique, la disponibilité de la chaleur résiduelle des zones industrielles, en les cartographiant pour le développement futur de l'ED (**EuroHeat & Power, 2013**).

	Waste heat (MW _e)	Power (MW _e)	Households powered	Households heated	CO ₂ reduction (tonnes)
Exhaust stacks					
120 to 230 °C	85	14	15,555	16,608	150,762
230 to 1100 °C	64				40,620
Coolers and compressors					
80 to 230 °C	144			27,996	245,132
Total	293	14	15,555	44,604	436,514




Tableau II.3 Chaleur résiduelle des industries de transformation :

Source: Alberta Heartland, 2014. Energy Mapping Study.

K. Church

Natural Resources Canada, Ottawa, ON, Canada

Deux questions essentielles doivent être abordées avant de collecter et d'utiliser la chaleur résiduelle au sein d'un réseaux DE (District Energie) : à savoir la composition des gaz de combustion et leur point de rosée. L'abaissement de la température des gaz de combustion en dessous du point de rosée peut avoir un important potentiel de récupération d'énergie (2260 MJ/tonne de vapeur d'eau condensée) mais a également le potentiel de créer des dépôts corrosifs et des acides (par exemple, la créosote) dans le condenseur. La baisse de la température a également une incidence sur la flottabilité du flux de fumées, ce qui nécessite des ventilateurs à induction supplémentaires pour maintenir un fonctionnement efficace du système (ou de la chaudière). En raison de ces problèmes, Les exploitants d'installations préfèrent souvent limiter la chaleur récupérable à la teneur en chaleur sensible du flux, maintenir la température des fumées au-dessus de 150 °C, ce qui permet de maximiser la durée de vie de leurs composants d'échange thermique.

I.2.2.2. Récupération de chaleur à partir de sources à basse température :

Les arènes sportives et les magasins de détail l'ont fait, pendant un certain temps, a récupéré la chaleur de basse qualité du réfrigérant condensé et l'a réutilisée comme préchauffage pour les douches ou pour le chauffage des vestiaires ou des pièces de stockage.

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

Avec la taille croissante des commerces ou des installations sportives d'aujourd'hui et leur besoin de fonctionner 24 heures sur 24, une opportunité économique peut se présenter pour collecter la chaleur et l'utiliser dans un réseau thermique local. Le chauffage des installations à l'aide du système DE pourrait être complété par la chaleur de faible qualité récupérée du réfrigérant du refroidisseur qui a été chauffé en plus à l'aide de la conduite de retour du DE. De cette manière, l'énergie nette demandée par l'installation serait réduite au minimum, la température de retour du réseau thermique diminuerait et l'efficacité globale du système augmenterait.

I.2.2.3. Récupération de la chaleur des eaux usées :

La récupération de la chaleur des eaux usées est rarement considérée comme un métier recherché. Cependant, la récupération de la chaleur des égouts est maintenant considérée comme une forme pratique d'approvisionnement en énergie, disponible dans presque toutes les communautés. À Vancouver, au Canada, par exemple, un projet réussi de récupération de chaleur au village olympique de South East False Creek a conduit à la proposition d'une stratégie énergétique à long terme à l'échelle de la ville qui utilise un réseau de systèmes DE, dont plusieurs pourraient s'appuyer sur la chaleur récupérée des eaux usées brutes.

Deux approches distinctes sont actuellement proposées pour la récupération de la chaleur des égouts : extraire la chaleur avant le traitement des eaux usées et extraire l'énergie après le traitement. Dans le premier cas, la température du courant est généralement comprise entre 12 et 25 °C, mais il est contaminé, et dans le second cas, le procédé est plus propre mais a une température souvent inférieure à 15 °C. Dans les deux cas, seuls quelques degrés de chaleur (généralement 5 °C) sont extraits des eaux usées à l'aide de pompes à chaleur utilisées pour porter la température de l'eau DE à la température de fonctionnement du réseau. Le choix de l'option qui convient le mieux à la communauté dépend des paramètres de conception : l'emplacement, l'accès à une conduite d'égout ou à une installation de traitement, le débit et la température disponibles.

Cet approvisionnement en chaleur à basse température se prête au développement de la quatrième génération de systèmes DE dans lesquels les bâtiments connectés sont conçus pour supporter une température d'approvisionnement plus basse, parfois aussi basse que 55 °C. Ce niveau de température peut généralement être atteint par une pompe à chaleur, située soit dans l'installation centrale de DE, soit dans le bâtiment du client. Cette dernière approche "ambiante" présente des avantages distincts par rapport au système conventionnel, notamment

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

une réduction des pertes d'énergie du système de distribution et, puisque la pompe à chaleur se trouve dans le bâtiment du client, la possibilité de passer du chauffage au refroidissement, sans avoir besoin d'une infrastructure de distribution de refroidissement supplémentaire (**IEA DHC Annex X**).

I.2.2.4. Gaz de décharge :

Comme pour les égouts, la plupart des communautés ont accès à un site d'enfouissement. Bien que les avis puissent varier quant au protocole d'élimination des déchets à privilégier, les composants organiques d'une décharge bien gérée peuvent, grâce à la digestion anaérobie, fournir à la collectivité une source d'énergie de qualité relativement élevée. Pour éviter l'accumulation de méthane et une éventuelle explosion, le gaz était traditionnellement brûlé à la torche, libérant l'énergie directement dans l'atmosphère. Aujourd'hui, cependant, le gaz est collecté, nettoyé et utilisé pour la production locale d'électricité. La qualité de la construction des sites de décharge est variable, tout comme celle du stock d'alimentation et la qualité du flux gazeux qui en résulte est peu prévisible, généralement entre 50 et 70 % de méthane, selon le contenu, le compactage et l'infiltration d'air. La décharge se décompose plus lentement que les matériaux dans les digesteurs industriels, et la collecte des gaz peut ne pas se faire efficacement avant que les sites aient été couverts et scellés pendant 20 ans ou plus. Dans un environnement étanche, la décomposition entraîne une augmentation de la pression du gaz, qui peut être éliminée pendant encore 25 à 30 ans ou jusqu'à ce que le taux de génération ou la pression du gaz diminue. La **figure II.2** décrit la durée de vie d'une décharge typique, en mettant en évidence les périodes de production et de collecte des gaz. A titre indicatif, 1 million de tonnes de déchets de décharge produit typiquement plus de 12 000 m³/jour de gaz de décharge (**LFG Energy Project Development Handbook**).

I.2.2.5. Digestion anaérobie :

Les installations de digestion anaérobie (DA) existantes qui utilisent des déchets agricoles, des déchets organiques ou industriels ou des eaux usées municipales offrent un moyen de gérer les déchets et de créer des flux de biogaz utilisables. Dans de nombreux pays, la digestion des déchets industriels et des eaux usées municipales, décrite ci-dessus, est relativement courante, tandis que le traitement commercial des déchets solides et du fumier, y compris la production de chaleur et d'électricité, ne retient que lentement l'attention. Dans les communautés rurales, les matières premières peuvent être collectées de manière centralisée à

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

partir de plusieurs fermes, bien que les réglementations sanitaires locales puissent limiter la distance de transport pour éviter le transfert éventuel de maladies animales.

Puisqu'il s'agit de systèmes "vivants", fonctionnant à l'une des trois températures : 20 °C (cyclophiles), 35 °C (mésophile) ou 55 °C (thermophile), le maintien du régime de température et du niveau de pH est essentiel. Le gaz de digestion qui en résulte contient entre 60 et 70 % de méthane, soit plus que dans le cas du compostage aérobie ; le reste étant du dioxyde de carbone avec des traces de sulfure d'hydrogène, d'hydrogène et d'azote. Le gaz peut donc être utilisé dans des chaudières ou dans des systèmes de cogénération pour produire à la fois de la chaleur et de l'électricité destinées à la revente ou à la réutilisation pour maintenir le fonctionnement du système. Pour produire des quantités importantes de chaleur ou d'électricité, il faut un grand nombre d'animaux et souvent une approche coopérative ou régionale de l'exploitation est nécessaire [23].

II . Les méthodes utilisant les ressources renouvelables :

II.1. L'énergie solaire :

II.1.1. introduction :

L'énergie solaire thermique est bien connue comme une technologie valable pour la préparation d'eau chaude et le chauffage des locaux dans les immeubles d'habitation. Les systèmes solaires thermiques ont été développés pour une technologie mature et économiquement viable, prête à l'emploi même pour les climats froids et pour des applications spéciales, partout où la chaleur à basse température jusqu'à 100 °C est nécessaire. Selon Mauthner et Weiss (2013), la capacité mondiale installée s'élève à 234 GWth correspondant à 335 Mio m² de capteurs solaires (statut par 1 fin 2011). Les plus grands marchés sont la Chine, suivie par l'Europe, les États-Unis et le Canada.

Toutefois, à l'heure actuelle, la grande majorité sont des petits systèmes dans des maisons privées.

Les installations de chauffage solaire urbain (SDH) sont une application à grande échelle de l'énergie solaire thermique. De grands champs de capteurs solaires forment l'installation solaire thermique, qui alimente la chaleur solaire produite dans des réseaux de blocs ou du chauffage urbain dans les quartiers urbains, les petites communautés ou les grandes villes. Les champs de collecte sont soit installés au sol ou intégrés aux toits des

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

bâtiments. Les deux types de capteurs solaires, vitrés à plat et les collecteurs à tubes sous vide, sont utilisés, et les capacités des champs de collecteurs varient de 350 kWth à 50 MWth pour les plus grands systèmes (actuellement) installés. En combinaison avec des accumulateurs de chaleur, l'installation solaire thermique contribue de manière renouvelable et sans émission la chaleur solaire représente généralement 10 à 50 % de l'approvisionnement total en chaleur du système de chauffage domestique.

II.1.2. Énergie solaire thermique :

L'utilisation de l'énergie thermique du soleil comme source pour les systèmes d'DE est une réalité pour de nombreux pays. Traditionnellement considérée comme saisonnière ou intermittente, la pratique de l'approche a progressé avec l'inclusion de la thermographie saisonnière. Cet ajout rend l'énergie solaire thermique viable à presque toute latitude.

Plusieurs options de conception existent et sont discutées dans la documentation relative à la collection et l'utilisation de l'énergie solaire au sein de la communauté. L'efficacité et la technologie des collecteurs varie (voir **figure II.1**), la sélection étant basée sur le fait que les énergie complète un réseau thermique existant, tel qu'un système de cogénération alimenté par la biomasse, ou s'il s'agit d'alimenter un système autonome uniquement solaire, comme à Marstal, au Danemark, ou Okotoks, Canada (Marstal District Heating).

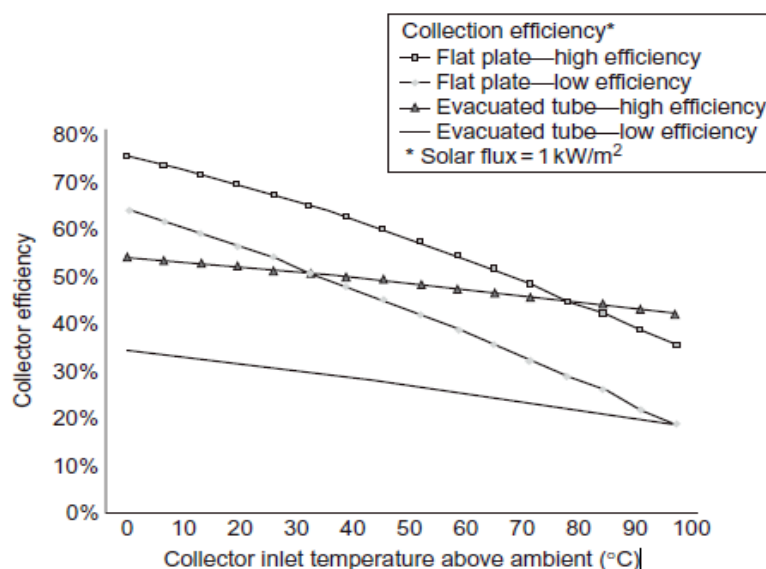


Figure II.1 Rendement des capteurs solaires.

K. Church

Natural Resources Canada, Ottawa, ON, Canada

source: Natural Resources Canada

Dans le premier cas, Marstal, une fraction de la chaleur collectée est immédiatement subsumée par le réseau. Cela nécessite l'utilisation de capteurs solaires à haut rendement, configurés pour générer et intégrer l'eau avec l'alimentation du système existant, fonctionnant généralement entre 85 et 90°C. La deuxième options, telle que décrite par le système de Drake Landing à Okotoks (Drak Landing Solar Community), utilise la technologie du stockage thermique pour stocker les surplus solaire. L'énergie des collecteurs et par conséquent, fournit un chauffage thermique tout au long de l'année à l'utilisateur. Une coordination est nécessaire entre les concepteurs du système et du bâtiment pour garantir que le système de chauffage du bâtiment raccordé peut fonctionner à une température d'alimentation inférieure et stockée, aussi bas que 45°C. Comme l'a démontré la communauté solaire de Drake Landing en Alberta, Canada, y compris le stockage thermique (à court terme et saisonnier) peut fournir plus de 90 % des besoins annuels en chauffage thermique des locaux. Lorsque l'énergie thermique du forage (BTES) est entièrement chargé, il peut fournir de la chaleur à 52 foyers à des températures supérieure à 50 °C.

II.1.3. Aperçu technologique des centrales solaires thermiques pour chauffage urbain :

Au cours des deux dernières décennies, différents concepts de systèmes pour le chauffage urbain solaire ont été développés et réalisés dans le cadre de nombreux projets. Les principales variables permettant de distinguer Les concepts sont :

- La façon dont la centrale solaire thermique est connectée au réseau (intégration centrale ou décentralisée).
- La taille de l'installation solaire thermique elle-même et la taille du système de distribution d'eau où l'installation solaire est raccordée au réseau (intégration centrale ou décentralisée) la chaleur thermique est injectée.

Ces derniers vont des petits réseaux de chaleur alimentant quelques bâtiments à systèmes fournissant.

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

La **figure II.2** montre l'intégration centrale d'une centrale solaire thermique directement sur le site d'une centrale de chauffage ou de cogénération, où souvent un grand accumulateur de chaleur est également situé et utilisé pour la centrale solaire thermique. Si les capteurs solaires sont situés à une certaine distance, par exemple, intégrée dans les toits des bâtiments, la chaleur est d'abord collectée par un réseau de tuyaux séparé puis transféré au centre de chauffage. La figure1 décrit plus en détail le système "décentralisé" de l'intégration d'une centrale solaire thermique à un endroit arbitraire du système de DH. Dans la plupart des centrales solaires thermiques intégrées de manière décentralisée sont sans accumulateurs de chaleur, c'est-à-dire que toute la chaleur solaire produite est injectée dans le réseau. Le stockage de la chaleur, si nécessaire, est fourni par le réseau. La majorité des systèmes solaires de chauffage domestique suivent le régime de l'intégration centrale.

Enfin, le dimensionnement représente un autre aspect permettant de différencier les systèmes de chauffage et de refroidissement, ce qui se traduit par une contribution spécifique de la chaleur solaire à la charge thermique totale du système DH, la soi-disant "fraction solaire". Par exemple, une grande centrale solaire thermique peut être utilisée comme préchauffeur avec des fractions solaires allant jusqu'à 5 %. Une couverture de 100 % de la charge thermique estivale est généralement atteinte avec une fraction solaire d'environ 15 % sur une base. Des fractions solaires allant jusqu'à 50 % de la charge thermique annuelle ont été démontrées pour des systèmes utilisant de grands accumulateurs de chaleur saisonniers, maintenant la chaleur solaire d'été jusqu'à la période de chauffage en hiver.

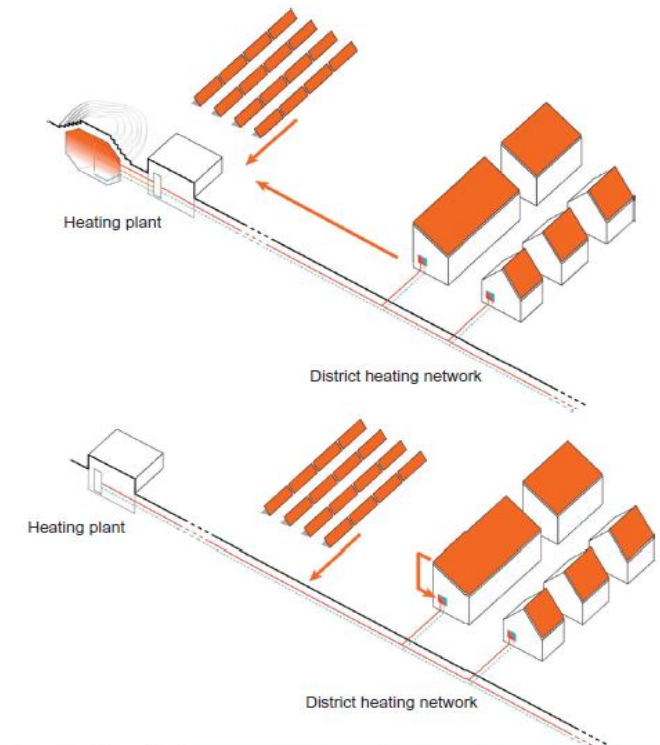


figure II.2: Intégration centrale et décentralisée d'une centrale solaire thermique dans un système de chauffage domestique.

Source : Solites.

Les sections suivantes présentent sept types de centrales solaires thermiques et leur intégration dans les systèmes DH. Ces types diffèrent, non seulement en ce qui concerne les aspects techniques comme indiqué ci-dessus, mais aussi en ce qui concerne les aspects organisationnels, par exemple les acteurs du marché et les parties prenantes impliqués dans le développement et le fonctionnement du projet.

Les sept types de centrales solaires de chauffage domestique sont les suivants

- Type 1 : Systèmes de chauffage solaire à eau chaude pour le chauffage collectif dans les quartiers.
- Type 2 : Systèmes solaires de chauffage urbain avec stockage de chaleur à long terme et fraction solaire élevée pour le chauffage en bloc chauffage dans les quartiers.
- Type 3 : Installations thermiques solaires intégrées de manière décentralisée pour les quartiers.

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

- Type 4 : Systèmes solaires thermiques pour les petites villes et communautés.
- Type 5 : Systèmes solaires de chauffage et de ventilation avec fourniture combinée d'électricité et de chaleur pour les petites villes et communautés (Smart DH).
- Type 6 : Centrales solaires thermiques à grande échelle avec intégration décentralisée dans les grandes DH urbaines systèmes.
- Type 7 : Installations solaires thermiques à grande échelle avec intégration centrale dans les grands systèmes de chauffage urbain [24].

II.2. Energie géothermique :

II.2.1. introduction :

La géothermie (mot issu du grec « gê » = terre et « thermos » = chaud) consiste à extraire l'énergie gratuite contenue dans le sol sans cesse régénéré par le rayonnement solaire, la pluie, le vent pour l'utiliser comme source froide pour le chauffage par pompe à chaleur , soit sous forme d'eau chaude utilisée pour chauffer directement des habitations, ou encore sous forme de vapeur pour produire de l'électricité.

Quand on creuse profondément sous terre, par exemple une mine ou un forage, on s'aperçoit que la température augmente peu à peu, en moyenne de 3°C par 100 mètres. C'est ce qu'on appelle le gradient géothermique.

II.2.2. Géothermie :

Dans la plupart des pays, le terme "géothermie" définit la récupération de la chaleur des couches supérieures de la terre, à plusieurs mètres de la surface. Comme le montre la figure 6.6, la température de la terre à une profondeur de 6 m reste relativement constante et permet d'extraire un apport régulier de chaleur de basse qualité .

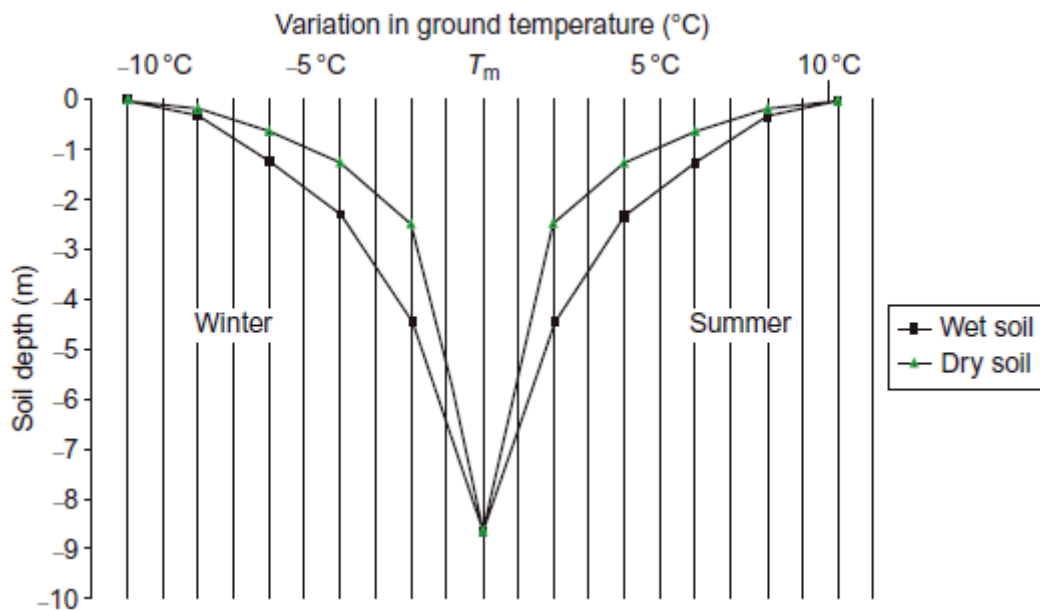


Figure II.3 : Variation de la température du sol en fonction de la profondeur.

K. Church
Natural Resources Canada, Ottawa, ON, Canada

Source: Build it solar. <http://www.builtitsolar.com/Projects/Cooling/EarthTemperatures.htm>.

La température peut alors être augmentée en utilisant une pompe à chaleur. L'application de la géothermie a été courante pour les bâtiments uniques et devient de plus en plus populaire auprès des collectivités.

La ville de Richmond, au Canada, utilise un système de géothermie/chaudière à gaz avec un champ de captage de 385 forages (Stantec, 2013) pour assurer le chauffage et le refroidissement des locaux à un projet de développement urbain. La construction de l'aménagement a commencé en 2011 et se poursuivra jusqu'en 2016, date à laquelle la demande de pointe devrait atteindre près de 18 MWt.

II.2.3. Énergie géothermique profonde :

À moins que les conditions géologiques ne prévalent (comme en Islande ou en Nouvelle-Zélande), la récupération de l'énergie géothermique nécessite un forage profond dans la croûte terrestre (d'où le terme "géothermie profonde").

L'énergie peut alors être récupérée sous forme d'eau à haute pression et température, ou sous forme de vapeur permettant de faire tourner des turbines et de produire de l'électricité.

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

L'eau ou la vapeur extraite présente ses propres défis en termes de teneur en minéraux et de caractère corrosif et abrasif pour l'équipement. L'économie de la géothermie profonde est spécifique à chaque site, comme le décrivent Matek et Garwell (2014) [25].

II.2.4. Utilisation et installation :

Il existe trois types d'installations géothermiques qui servent toutes au chauffage. Seules les centrales de géothermie profonde permettent également de produire de l'électricité.

✓ Les pompes à chaleur

Les pompes à chaleur utilisent la géothermie de surface pour le chauffage. Elles captent la chaleur souterraine peu profonde, où la température reste inférieure à 30°C. On utilise cette géothermie dite « à basse température », pour chauffer des maisons et de grands bâtiments. C'est la technique la plus fréquemment utilisée en Suisse. Les puits installés peuvent aller de 80 à 400 mètres de profondeur.

Dans le puits, une sonde verticale en forme de U envoie un liquide sous terre. Ce liquide est ensuite pompé pour être remonté à la surface. Sa température est alors de 10 à 20°C. Cette chaleur va ensuite être valorisée par une pompe à chaleur qui va élever sa température. Cela permet de chauffer de l'eau pour toute la maison : radiateurs, douches, robinets.

✓ Les installations hydrothermales

Il existe des sources d'eau naturellement chaude sur tous les continents et même au fond des mers. Pour les atteindre, on utilise des installations dites hydrothermales. Si les gisements se situent à moins de 3'000 mètres, on parle de géothermie de moyenne profondeur. L'eau souterraine atteint alors 50-70°C et est utilisée pour le chauffage. La géothermie profonde permet pour sa part d'atteindre des sources situées à -3000 et -5000 mètres, où l'eau atteint des températures supérieures à 100°C. Surchauffée ou sous forme de vapeur, cette eau jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine, ce qui permet de produire de l'électricité !

Sur la Côte, entre Aubonne et Nyon (VD), le projet EnergieÔ vise à valoriser la chaleur du sous-sol en pompant de l'eau souterraine retenue dans des roches naturellement fissurées (aquifères). Ces sources se situent entre 2'200 et 5'000 mètres de profondeur. Dans un premier temps, vers le village de Vinzel, les forages de géothermie de moyenne profondeur devraient permettre d'alimenter environ 1'500 ménages via un chauffage à distance. Dans un second temps, des forages de géothermie profonde pourraient permettre de remonter de l'eau

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

à plus de 100°C. Dans la centrale géothermique, cette eau plus que bouillante serait utilisée pour actionner des [turbines](#) et produire ainsi de l'électricité.

✓ Les installations pétro thermales

S'il n'y a pas de source thermale, il est tout de même possible de profiter de la chaleur du sous-sol, avec les installations pétrothermales de géothermie profonde. Les tours de forages creusent des puits de 3 à 5 kilomètres de profondeur, afin d'installer des sondes qui traversent de la roche à très haute température. On y envoie ensuite du liquide qui, au contact de ces roches naturellement surchauffées, remonte à plus de 100°C. Ce liquide est alors utilisé pour le chauffage et la production d'électricité.

Un projet développé à Glovelier (commune de Haute-Sorne, JU) vise à utiliser la chaleur des roches situées entre 4'000 et 5'000 mètres de profondeur. L'eau envoyée sous terre pourra être remontée naturellement chauffée à 150°C. L'objectif est de produire de l'électricité pour plus de 6'000 ménages [26].

✓ Les quatre types de géothermie :

On distingue quatre types de géothermie : la haute, la moyenne, la basse et la très basse énergie [27].

Types	Caractéristiques	Utilisations
Très basse Energie	Sol entre 10°C et 15°C	Chauffage et rafraîchissement des locaux avec pompe chaleur par capteur de surface ou forage dans le sol
Basse énergie	30°C < T° < 100°C	Chauffage urbain, utilisations industrielles, thermalisme
Moyenne	100°C < T° < 180°C	Production d'électricité (eau sous forme de vapeur)
Haute énergie	180°C < T° < 380°C	Production d'électricité (eau sous forme de vapeur)

II.2. Biomasse :

II.2.1. Introduction :

La biomasse est un terme qui couvre différents types de matières organiques pouvant être traitées et brûlées pour produire de l'énergie. La biomasse comprend par exemple les résidus forestiers et agricoles ou les granulés de bois, qui sont l'une des plus riches sources de carburants durables et respectueux de l'environnement.

La biomasse est facilement disponible dans la plupart des régions du pays, mais les sources proches déterminent souvent le type exact, comme les produits du bois dans les régions forestières et les résidus agricoles dans les régions agricoles.

Le coût et la rareté des combustibles fossiles ainsi que l'intérêt mondial pour l'utilisation accrue des énergies renouvelables ont amené l'énergie de la biomasse au premier plan. Bien que la combustion de la biomasse libère du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, elle est compensée par le dioxyde de carbone absorbé lors de la croissance initiale de la biomasse.

II.2.2. L'énergie biomasse :

La biomasse la plus couramment utilisée pour les systèmes d'ED communautaires arrive généralement sous forme de copeaux de bois. Il est facilement disponible en bois dur ou en bois tendre selon l'endroit, bien que dans les situations urbaines, l'utilisation d'autres formes telles que le bois de construction et de démolition, les résidus de jardin et les chutes d'arbres soit en augmentation.

Le volume de déchets de bois urbains propres est souvent estimé et ignoré en tant que source d'énergie. Par exemple, une estimation non publiée suggère que le volume de déchets urbains de bois collectés comme ordures ménagères ordinaires dans la ville d'Ottawa, au Canada, pourrait alimenter une centrale de cogénération de 17 MWe.

Actuellement, ces déchets sont broyés conformément avec un vaste programme de recyclage et offert au public pour l'utilisation dans les jardins.

Pour les communautés plus petites ou rurales, la production de copeaux de bois au niveau local offre le potentiel de bénéfices locaux, et probablement à un prix relativement bas. En conjonction avec les scieries ou les parcs à bois locaux, les systèmes d'ED de petite et

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

moyenne taille peuvent être particulièrement efficaces pour fournir une énergie à un coût compétitif.

Toutefois, ils exigent le soin apporté à la conception des installations en ce qui concerne les équipements de combustion, la manipulation des combustibles et l'emplacement du stockage des combustibles (les gros tas de combustibles sont parfois inesthétiques).

De nombreuses installations ne conservent que leurs besoins en combustible à court terme sur le site et maintiennent un stockage à long terme ailleurs.

La biomasse est souvent utilisée dans les chaudières à combustible fossile existantes comme agent de co-combustion pour réduire le taux global d'émissions de gaz à effet de serre. Cette situation est plus fréquente dans les grandes unités de taille industrielle.

Des tests approfondis sur la question de la co-combustion suggèrent qu'il devrait y avoir une limite supérieure de 25-30% de biomasse dans le mélange de co-combustion pour maintenir la stabilité de la combustion. Lorsqu'une élimination complète du combustible fossile n'est pas possible ou pratique, la co-combustion avec un produit de la biomasse pourrait offrir des possibilités importantes et une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Pour assurer la cohérence des échanges, il existe des normes pour la production et la vente de copeaux de bois, en précisant les propriétés physiques, telles que la taille et la teneur en humidité, ainsi que la teneur en cendres et d'autres exigences en matière d'informations chimiques (EN plus, Catalogue des normes ISO, Wood Pellet Association) [28].

II.2.3. Principe de fonctionnement :

Une pompe envoie une solution diluée de bromure de lithium (LiBr) de l'absorbeur au générateur, où le fluide de chauffage circulant dans l'échangeur de chaleur du générateur. La vapeur du réfrigérant, libérée de la solution diluée, s'écoule vers l'échangeur de chaleur du condenseur où elle est condensée à l'état liquide par le rejet de la chaleur vers le circuit d'eau de refroidissement.

En raison de la séparation partielle de la solution de LiBr et de l'eau pendant l'ébullition dans le générateur, la part de LiBr dans la solution restante augmente.

Cette solution concentrée passe du générateur à l'absorbeur où elle s'écoulera à la surface de la bobine d'échange de l'absorbeur.

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

Comme l'eau de refroidissement du circuit de refroidissement circule dans le serpentin de l'absorbeur, il y a une faible pression de vapeur dans la salle commune de l'évaporateur et de l'absorbeur en raison de la forte concentration de la solution de LiBr.

C'est dans cet environnement que le liquide réfrigérant provenant du condenseur se rencontre lorsqu'il circule dans le serpentin et entre dans l'évaporateur.

La solution concentrée absorbe la vapeur du réfrigérant de l'évaporateur lorsque le liquide réfrigérant change d'état pour devenir de la vapeur, en prenant l'énergie de la vaporisation de l'eau réfrigérée circulant dans l'échangeur de l'évaporateur. Cette extraction de chaleur entraîne la production d'eau réfrigérée.

La **Figure II.4** montre le processus de maintien du système à un vide élevé, qui permettrait à l'eau de se refroidir d'elle-même par flash lors de l'interaction avec l'eau réfrigérante. L'eau réfrigérante est ensuite envoyée dans le système pour équilibrer la chaleur générée par l'eau chaude, générant ainsi de la vapeur.

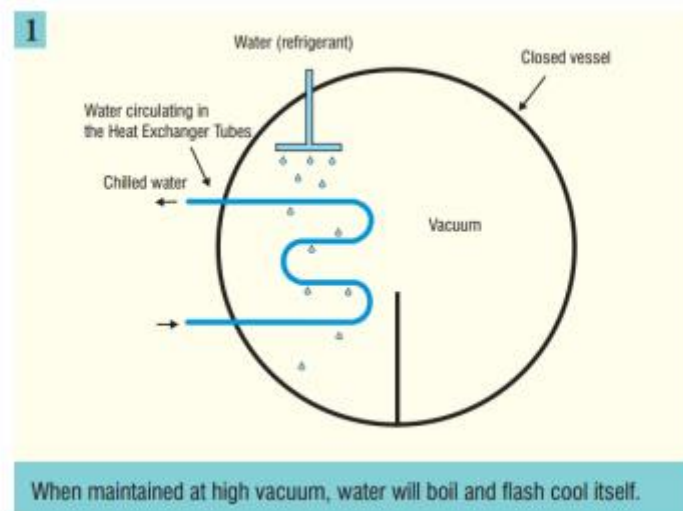


Figure II.4 Système de refroidissement - Effet de réfrigération.

Source : <http://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/productssystems/equipment/chillers/absorption-liquid/hotwaterdrivenabsorptionchillers.pdf>.

L'évaporation du réfrigérant se fait à basse pression. La solution diluée, qui contient la vapeur de réfrigérant absorbée et la solution de LiBr, subit une pression plus élevée lorsqu'elle est chauffée.

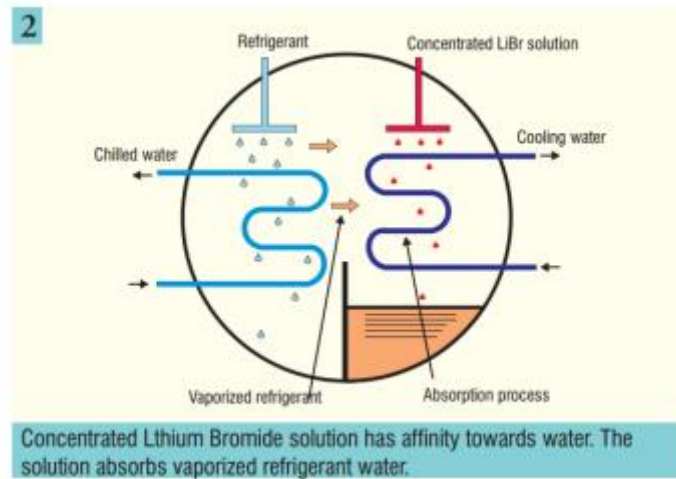


Figure II.5 Système de refroidissement - LiBr concentré

Source Reprinted from Trane. (2016). *Trane Commercial Heating and Air Conditioning*. Trane University. Retrieved from

Cela conduit à la vaporisation du réfrigérant, qui perd sa capacité. Dans la figure suivante, le réfrigérant est concentré en utilisant la chaleur supplémentaire produite par la source de chaleur externe et ainsi, le rétablissement de la solution à sa concentration initiale est atteint pour une utilisation future. Le cycle se répète sans cesse pour donner l'effet de refroidissement souhaité grâce aux vapeurs ou au réfrigérant LiBr et à l'eau.

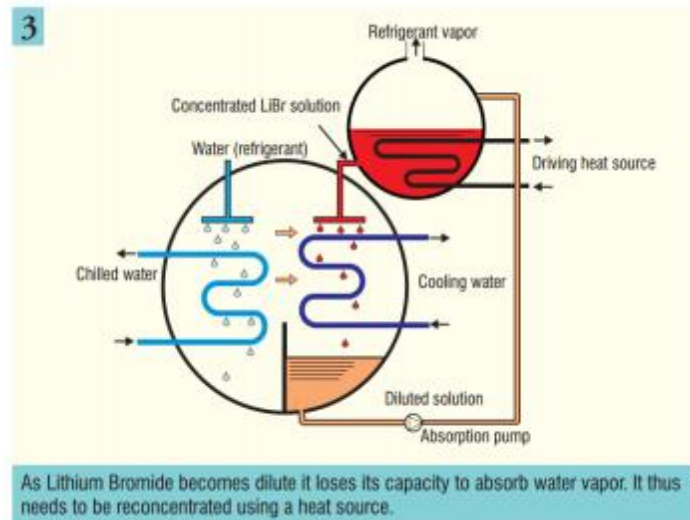


Figure II.6 Système de refroidissement - LiBr reconcentré

Source Commercial Heating and Air Conditioning. Trane University. Retrieved from <http://www.trane.com/commercial/north-america/us/en.html>.

Reprinted with permission from Thermax USA.

La Figure II.7 montre le processus de refroidissement du réfrigérant absorbé sous forme de vapeur dans une chambre externe, qui est recyclée pour devenir le réfrigérant liquide utilisé à l'étape 1. Dans les machines à absorption ProChill (double conception), l'eau chaude passe d'abord par un générateur haute pression, puis par un générateur basse pression pour améliorer l'efficacité du cycle.

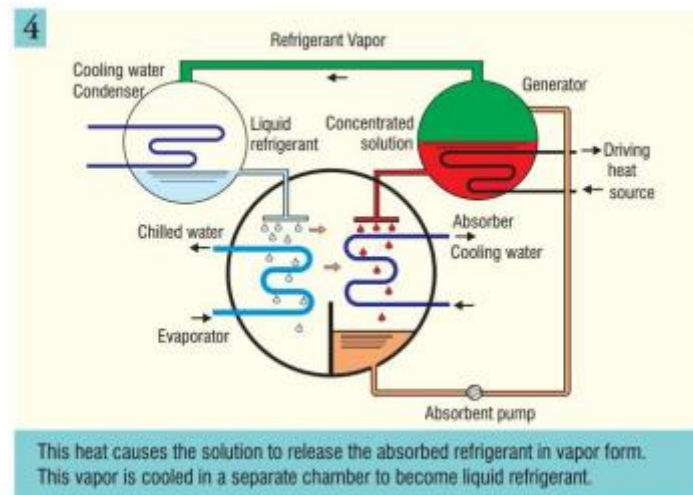


Figure II.7 Système de refroidissement - Réfrigérant liquide.

Source <http://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/productssystems/equipment/chillers/absorption-liquid/hotwaterdrivenabsorptionchillers.pdf>.

Reprinted with permission from Thermax USA.

Le réfrigérant passe ensuite par une série de processus pour compléter le cycle de refroidissement **Figure II.8**.

C'est un processus reproductible qui génère l'effet de refroidissement du refroidisseur à absorption est un processus reproductible qui génère l'effet de refroidissement du refroidisseur à absorption. Les processus comprennent évaporation, absorption, pressurisation, évaporation, condensation, étranglement et expansion.

Au cours de ce cycle, le réfrigérant absorbe la chaleur d'une source de chaleur à basse température et la restitue à une température élevée l'unité de stockage de la température.

Une tour de refroidissement est généralement utilisée pour exposer la source de chaleur à basse température (eau) à la température de l'atmosphère pour la refroidir [29].

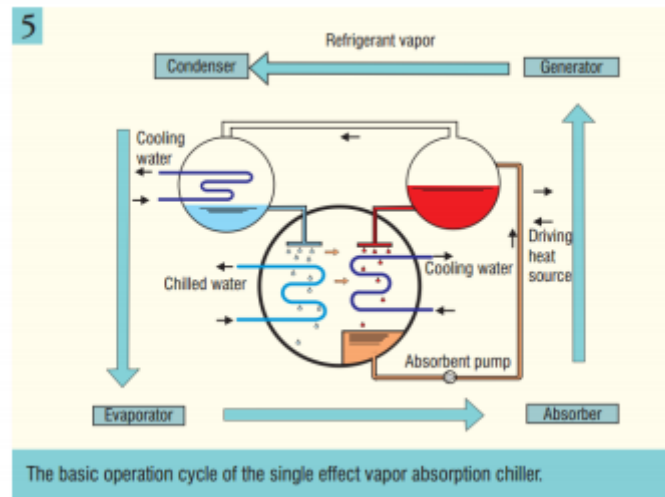


Figure II.8 Système de refroidissement - Refroidisseur à absorption de vapeur à effet unique

Source [http://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/productsystems/](http://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/productsystems/equipment chillers/absorption-liquid/hotwaterdrivenabsorptionchillers.pdf)

[equipment chillers/absorption-liquid/hotwaterdrivenabsorptionchillers.pdf](http://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/productsystems/equipment chillers/absorption-liquid/hotwaterdrivenabsorptionchillers.pdf).

Reprinted with permission from Thermax USA.

III. Exemples de projets énergétiques :

III.1. Le projet énergétique d'Aurigny 5 :

Le site du projet énergétique Alderney 5, situé à Dartmouth, au Canada, regroupe les besoins de refroidissement de cinq bâtiments municipaux adjacents d'une superficie totale de 31 000 m². Le projet (**QUEST Canada, 2012**) est géré par la municipalité régionale de Halifax et utilise les propriétés de refroidissement naturel de l'eau du port pour remplacer le refroidissement mécanique conventionnel à base de fréon du complexe. Le projet a été doublement réussi, dans la mesure où il a intégré des technologies traditionnelles à de nouvelles idées en générant un système de refroidissement à base d'eau de mer pour le complexe municipal. Les technologies existantes répondaient à un audit énergétique des propriétés et comprenaient des mesures d'éclairage et d'économie d'eau ainsi qu'un changement de combustible de chauffage, passant du pétrole au gaz naturel. La nouvelle technologie incorporée dans le projet consiste à refroidir l'eau de mer directement et indirectement dans les bâtiments, en utilisant le stockage d'énergie thermique souterrain/en trou de forage (UTES). Le système est configuré de telle sorte que l'eau de mer est pompée du port, à travers un échangeur de chaleur pour refroidir une boucle secondaire eau douce/glycol. C'est cette boucle secondaire qui circule à travers les forages et le propre système de

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

distribution de refroidissement du bâtiment, en collectant la chaleur des bâtiments. Pendant les mois d'hiver, le port gèle rarement, et la boucle eau douce/glycol refroidie refroidit les 80 forages verticaux, chacun de 0,115 m de diamètre et 150 m de profondeur, situés dans le parking adjacent. Le socle rocheux refroidi constitue un puits de refroidissement efficace pour l'extraction pendant les mois d'été les plus chauds, lorsque l'eau de mer est moins efficace pour refroidir les bâtiments. Les données météorologiques indiquent que le nombre de degrés-jours de refroidissement (sur la base de 18 °C) pour la municipalité régionale de Halifax fluctue autour de 90 mais a augmenté régulièrement au cours des 25 dernières années. Cependant, comme c'est généralement le cas dans l'environnement des bâtiments commerciaux, le refroidissement est nécessaire toute l'année. Le refroidissement gratuit du port est facilement disponible de décembre à juin, tandis que l'eau du port reste inférieure à 9 °C et que le refroidissement stocké est utilisé pendant le reste de l'année. Les craintes que le système de refroidissement mécanique soit nécessaire pour les périodes de pointe ont été dissipées lorsque le refroidissement disponible s'est avéré suffisant pour cette tâche. La technologie, telle que démontrée ici, pourrait être installée dans d'autres endroits où les communautés pourraient utiliser des lacs, des rivières ou d'autres grandes masses d'eau pour leurs besoins de refroidissement.

III.2. Le projet de Lonsdale's DH :

La Lonsdale Energy Corporation (LEC) a été créée en 2003 à North Vancouver, en Colombie-Britannique (Canada), pour répondre à la volonté de la communauté de soutenir le développement à faible émission de carbone du centre ville. Le développement urbain utilisant le DE a été amélioré grâce à un règlement des services énergétiques qui exigeait le raccordement au système énergétique proposé. Au départ, les promoteurs s'y sont opposés, mais ce règlement a ensuite été considéré comme un argument de vente positif pour les propriétés "écologiques".

Le LEC a choisi de développer le système DE comme une série de mini-usines distribuées et connectées au réseau de tuyauterie souterrain, plutôt que comme une unité unique et centralisée. Il s'agissait de réduire le risque associé aux fluctuations du marché ayant un impact sur le taux de construction des propriétés commerciales et résidentielles.

Le système compte maintenant six de ces mini-usines : un mélange de chaudières à gaz naturel à haut rendement, de pompes à chaleur géothermiques, de chaleur récupérée des

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

systèmes de refroidissement des bâtiments et de panneaux solaires thermiques. Les clients comprennent 42 bâtiments qui contiennent plus de 330 000 m² de surface chauffée.

Les chaudières à gaz naturel ont d'abord été installées seules, puis complétées par des pompes à chaleur géothermiques qui collectaient la chaleur et la transféraient directement au système DE. Afin de maximiser l'efficacité de l'exploitation, ils ont fourni un refroidissement à deux clients importants : un bureau de la commission scolaire et une galerie d'art. En parallèle, un ensemble de 120 panneaux solaires thermiques a été installé et avec cette variété de sources d'énergie et la configuration distribuée, il a été démontré que le système atteint des rendements allant jusqu'à 98%, dépassant de loin l'efficacité de celle qui aurait normalement été utilisée dans des propriétés résidentielles à plusieurs unités. La prochaine opportunité que Lonsdale examine est le captage et l'utilisation de la chaleur des processus industriels situés à côté du système DE et un passage aux carburants alternatifs et renouvelables.

III.3. Système énergétique communautaire de Revelstoke :

La ville de Revelstoke est située dans les montagnes de la Colombie britannique, au Canada, avec une superficie d'un peu plus de 30 km² et une population de 8100 habitants. Le principal employeur de la région est le secteur forestier, ce qui explique la présence d'une scierie dans le centre-ville. La géographie physique de Revelstoke est un terrain escarpé et accidenté, avec des flancs de montagne enneigés d'épinettes anciennes et des microclimats de forêt tropicale tempérée dominés par le cèdre, qui a été l'élément vital de l'industrie du bois dans la région.

Le développement du système a commencé sérieusement en 2000 après que le gouvernement provincial ait décidé de supprimer progressivement l'utilisation de brûleurs en ruche comme moyen d'élimination des résidus d'usine dans l'installation. Avant cette décision, plus de 70 000 tonnes de résidus ont été brûlés, un processus lent et inefficace entraînant des émissions de particules qui ont recouvert les bâtiments et les véhicules à proximité. Le choix de la communauté pour le DE était basée non seulement sur la production d'énergie pour la Communauté, mais aussi sur la nécessité d'améliorer la qualité de l'air. La chaudière à biomasse de 1,5 MWt fournit de la chaleur pour le système DE, ainsi que pour les fours de séchage de l'usine. Une boucle d'huile chaude intermédiaire depuis la chaudière permet de produire de la vapeur pour les fours ainsi que de l'eau chaude pour les 2,3 km de tuyauterie DH reliant les 10 clients. Il s'agit notamment d'un centre de loisirs, de deux écoles, d'un hôtel et du bâtiment administratif de la ville. Auparavant, le chauffage pour ces clients était au

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

propane, en raison de l'emplacement de la communauté. L'utilisation de résidus de bois locaux a déplacé une grande partie du chauffage aux combustibles fossiles dans la communauté du centre-ville, réduisant les émissions de gaz à effet de serre de 3200 tonnes par an ainsi que les NOx et SOx associés à l'utilisation du propane ; les émissions de particules ont essentiellement chuté à zéro. Lors d'une évaluation économique du projet, il a été calculé que l'usine pourrait créer environ 62 personnes-années d'emploi, ce qui se compare favorablement à l'hypothèse habituelle de zéro.

IV. Tendances futures :

L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence le rôle joué par le combustible utilisé dans un système d'DE et la manière dont son choix influence ou est influencé par la planification ou les objectifs environnementaux fixés par la collectivité. L'utilisation de combustibles ou de sources d'énergie locales ou indigènes peut soutenir les plans de développement urbain, le développement économique ou les objectifs environnementaux. Cependant, plusieurs défis existent. Le faible coût des combustibles fossiles (en Amérique du Nord) et les infrastructures supplémentaires nécessaires à la distribution de l'énergie thermique sont autant d'obstacles au développement. Le risque de changement, d'entrer en territoire inconnu et d'utiliser une technologie non éprouvée est parfois trop grand pour un gouvernement municipal normalement conservateur. Cependant, face aux crises environnementales ou sociales, les collectivités recherchent la résilience, la protection contre un environnement de plus en plus instable, et c'est pourquoi l'utilisation des ressources locales (sur lesquelles elles ont plus de contrôle ou d'influence) prend une valeur croissante. Non seulement leur utilisation remplace la demande d'énergie (fossile) importée, mais elle réduit également la nécessité d'éliminer les matières indésirables de la société : l'énergie devient une partie intégrante de la conception et du fonctionnement de la communauté.

Le gaz naturel est aujourd'hui considéré comme le combustible de choix dans de nombreuses communautés. Toutefois, le choix du combustible de l'avenir concernera d'avantage la forme urbaine et sa fonction. À mesure que la conception des bâtiments évoluera vers un état proche de zéro ou un état net zéro, les systèmes énergétiques seront intégrés de manière à réduire les besoins en infrastructures et les pertes associées à la livraison. Toutefois, comme on l'a vu jusqu'à présent, l'équilibrage des charges et des fournitures au sein d'un même bien net zéro n'est pas aussi simple ni aussi rentable qu'on le souhaiterait. Un réseau externe sera nécessaire, qui servira de tampon pour fournir ou retirer

Chapitre II : Synthèse sur les différentes méthodes de la climatisation urbaine.

l'énergie selon les besoins. Par exemple, les bâtiments pourraient intégrer des capteurs solaires thermiques et photovoltaïques pour fournir de l'énergie au bâtiment, tout excédent étant acheminé vers le réseau de distribution qui est alimenté par l'énergie provenant d'une pompe à chaleur géothermique, de la chaleur des égouts ou de la digestion des déchets organiques locaux. Le stockage thermique à court terme pour compléter l'infrastructure de distribution, qu'il soit inclus dans les grands bâtiments ou qu'il fasse partie d'une structure de stockage saisonnier plus importante, favorisera le développement de la quatrième génération ou des systèmes ambiants, plutôt que les systèmes à température plus élevée qui prévalent actuellement.

La nécessité de mettre en place un réseau énergétique plus intelligent, où les systèmes thermiques et électriques interagissent pour minimiser leur impact environnemental et contribuer au développement urbain, impliquera un réseau énergétique partagé et ouvert. Cette perspective plus large de la valeur de l'DE pourrait positionner l'infrastructure requise dans la même perspective que celle requise pour l'eau et les égouts ; une infrastructure publique essentielle dont le coût est inclus dans le budget annuel global de la ville.

Ce réseau énergétique intelligent en pleine évolution pourrait intégrer plusieurs centres énergétiques, en regroupant les besoins électriques et thermiques de l'environnement bâti avec ceux des transports publics. En Suède, par exemple, des communautés produisent déjà du biogaz à partir de déchets pour l'utiliser comme carburant dans les transports publics (**IEA Bioenergy Task 37**) et le rassemblement des différents vecteurs énergétiques sous un seul réseau coordonné ne serait possible que lorsqu'un support commun, tel que DE est central [30].

*Chapitre III : Etude
comparative entre une machine
à absorption et une machine
conventionnelle dans le cadre de
la climatisation urbaine.*

Chapitre III : Etude comparative entre une machine à absorption et une machine conventionnelle dans le cadre de la climatisation urbaine.

I. Introduction :

L'affluence des recettes pétrolières durant les années 2000 a permis à l'Algérie d'entreprendre des projets de construction massive. Par conséquent, les coûts énergétiques alloués au confort thermique dans le secteur résidentiel ont connu une augmentation dramatique.

Les machines conventionnelles de production de froid fondées sur le principe de la compression de vapeur consomment beaucoup d'électricité primaire et leurs fluides de travail sont bannis par la législation internationale. Les systèmes de refroidissement centralisés en tant que technologie de production de froid constituent une des meilleures alternatives.

Dans ce qui suit, une modélisation thermodynamique d'une machine à absorption à simple effet est transcrite sous environnement EES. Se basant sur les résultats, notamment sur la capacité de refroidissement, la puissance consommée par une machine frigorifique dont le COP est prédéterminé est évaluée et permet ainsi d'estimer le coût de fonctionnement faisant abstraction des chaleurs de génération dans le désorbeur et des rejets de chaleur au niveau de l'absorbeur et des condenseurs.

II. Modélisation thermodynamique d'une installation à absorption à simple effet :

La solution aqueuse de bromure de lithium ($H_2O-LiBr$) est l'une des nombreuses autres solutions largement utilisées dans les systèmes à absorption utilisés à des fins de chauffage et de refroidissement [16]. Ce couple est utilisé depuis les années 1950 lorsque cette technologie a été lancée par plusieurs fabricants américains où l'eau agit comme réfrigérant qui absorbe et élimine la chaleur de l'environnement spécifique tandis que le bromure de lithium devient absorbant.

En tant qu'absorbant, le bromure de lithium est avantageux car il est essentiellement non volatil, ce qui donne l'avantage à une conception évitant le besoin de rectifieurs. L'eau est avantageuse en tant que réfrigérant car elle ne cristallise pas. Toutefois, son utilisation limite le fonctionnement du système à des températures de réfrigération supérieures à $0\text{ }^{\circ}C$ ou même $5\text{ }^{\circ}C$, en raison du point de congélation de l'eau. Le bromure de lithium est une substance à base de sel de lithium qui est solide dans des conditions normales. Le sel de bromure de lithium se dissout dans l'eau et forme une pression de vapeur d'équilibre inférieure à celle de l'eau pure à la même température de fonctionnement.

Un système frigorifique à absorption au couple $LiBr-H_2O$ est un cycle thermique nécessitant de la chaleur pour fonctionner d'une part et il rejette de l'énergie thermique à son

Chapitre III : Etude comparative entre une machine à absorption et une machine conventionnelle dans le cadre de la climatisation urbaine.

environnement d'autre part. Il produit du froid souvent à une pression inférieure à la pression atmosphérique (des pressions de travail qui ne dépassent pas 10 kPa) [17].

La figure III.1.1 illustre une représentation typique des composants d'un système de réfrigération à absorption et qui peut être schématisée sur un diagramme de Dühring qui décrit le cycle en considérant les niveaux de température et de pression de chaque composant et leurs positions dans le système, ainsi que leur transfert d'énergie. Un diagramme de Dühring ne peut montrer que schématiquement les états saturés alors que les états surchauffés et sous-refroidis ne peuvent pas être présentés avec précision.

L'absorbeur est une enceinte où la solution binaire et la vapeur de réfrigérant sont mélangés ensemble. Le processus d'absorption ne peut se produire que si l'absorbeur est à un niveau sensible de basse température, d'où la nécessité du système de rejet de chaleur. Ce processus génère une chaleur latente de condensation et élève la température de la solution. Une température d'absorption inférieure signifie plus de capacité de réfrigération en raison du débit de réfrigérant plus élevé provenant de l'évaporateur.

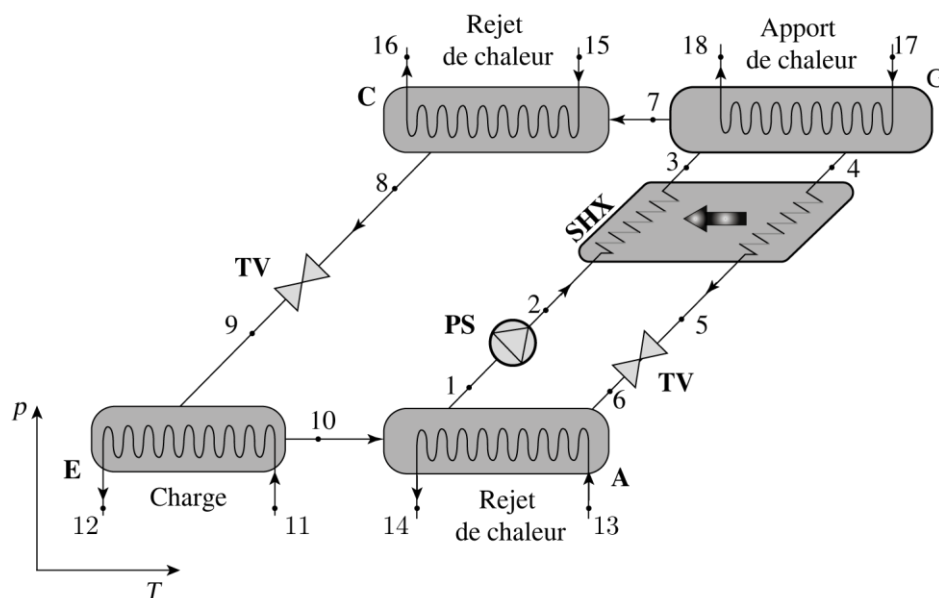


Figure III. 1 : Points figuratifs d'un système de réfrigération à absorption.

La solution riche à la sortie de l'absorbeur (A) est pompée à l'aide de la pompe de solution (SP), elle échange de la chaleur avec la solution pauvre provenant du désorbeur (G) dans un échangeur intermédiaire SHX avant d'entrer au désorbeur. L'apport de chaleur au niveau du désorbeur libère la vapeur de réfrigérant qui passe au condenseur (C) et la solution pauvre est renvoyée à l'absorbeur. La chaleur libérée au cours de la condensation est évacuée par le

Chapitre III : Etude comparative entre une machine à absorption et une machine conventionnelle dans le cadre de la climatisation urbaine.

système de rejet de chaleur. Le réfrigérant sous forme de liquide saturé est détendu dans une vanne de détente (TV) et entre dans l'évaporateur (E).

La modélisation du système repose sur un bilan massique et énergétique au niveau de chaque composant de l'installation. Il est possible, par la suite, d'utiliser le modèle pour étudier ces interactions avec l'environnement, notamment celles liées à l'apport et au rejet de chaleur.

III. Bilan massique et énergétique

Au niveau de l'absorbeur

La chaleur dégagée par le processus de mélange du réfrigérant et de la solution (absorption) est égale à la chaleur évacuée par le système de rejet de chaleur :

$$\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_{13} (h_{14} - h_{13}) \quad (1)$$

L'équilibre massique du sel au niveau de l'absorbeur est donné par :

$$\dot{m}_6 x_6 + \dot{m}_{10} x_{10} = \dot{m}_1 x_1 \quad (2)$$

Puisque la vapeur de réfrigérant ne contient pas de sel, l'équation précédente devient :

$$\dot{m}_6 x_6 = \dot{m}_1 x_1 \quad (3)$$

Le bilan massique est exprimé par :

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_1 \quad (4)$$

La différence de température logarithmique moyenne servant au calcul de la surface d'échange de l'absorbeur est donnée par :

$$DTLM_a = \frac{(T_6 - T_{14}) - (T_1 - T_{13})}{\ln \left(\frac{T_6 - T_{14}}{T_1 - T_{13}} \right)} \quad (5)$$

Au niveau du désorbeur

L'équilibre massique du sel au niveau du désorbeur est déterminé par :

$$\dot{m}_4 x_4 + \dot{m}_7 x_7 = \dot{m}_3 x_3 \quad (6)$$

qui devient:

$$\dot{m}_4 x_4 = \dot{m}_3 x_3 \quad (7)$$

Le bilan massique à ce niveau est :

$$\dot{m}_4 + \dot{m}_7 = \dot{m}_3 \quad (8)$$

Chapitre III : Etude comparative entre une machine à absorption et une machine conventionnelle dans le cadre de la climatisation urbaine.

L'apport de chaleur nécessaire à la désorption est partagé entre le réfrigérant qui regagne le condenseur et les solutions riche provenant de l'échangeur SHX et pauvre qui sort du désorbeur :

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_3 x_3 = \dot{m}_{17} (h_{17} - h_{18}) \quad (9)$$

La différence de température logarithmique moyenne servant au calcul de la surface d'échange du désorbeur est donnée par :

$$DTLM_d = \frac{(T_{17} - T_4) - (T_{18} - T_3)}{\ln \left(\frac{T_6 - T_{14}}{T_{18} - T_3} \right)} \quad (10)$$

Au niveau du condenseur

Au niveau du condenseur, la chaleur dégagée de la condensation est évacuée le système de rejet de chaleur et la $DTLM_c$ sont comme suit :

$$\dot{m}_7 (h_7 - h_8) = \dot{m}_{15} (h_{16} - h_{15}) \quad (11)$$

$$DTLM_c = \frac{(T_7 - T_{16}) - (T_8 - T_{15})}{\ln \left(\frac{T_7 - T_{16}}{T_8 - T_{15}} \right)} \quad (12)$$

Au niveau de l'évaporateur

Ainsi, au niveau de l'évaporateur :

$$\dot{m}_{11} (h_{12} - h_{11}) = \dot{m}_9 (h_{10} - h_9) \quad (13)$$

$$DTLM_c = \frac{(T_{11} - T_{10}) - (T_{12} - T_9)}{\ln \left(\frac{T_{11} - T_{10}}{T_{12} - T_9} \right)} \quad (14)$$

Au niveau de l'échangeur intermédiaire SHX

L'échangeur intermédiaire SHX assure un échange de chaleur qui bénéficie à la solution riche provenant de l'absorbeur qui se trouve ainsi chauffée en refroidissant la solution pauvre provenant du désorbeur. Le bilan énergétique à ce niveau ainsi que l'efficacité de cet échangeur sont donnés respectivement par :

$$\dot{m}_2 (h_3 - h_2) = \dot{m}_4 (h_4 - h_5) \quad (15)$$

$$\epsilon_{SHX} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_2} \quad (16)$$

Chapitre III : Etude comparative entre une machine à absorption et une machine conventionnelle dans le cadre de la climatisation urbaine.

La surface d'échange de l'échangeur intermédiaire SHX est donnée par :

$$DTLM_{SHX} = \frac{(T_4 - T_3) - (T_5 - T_2)}{\ln\left(\frac{T_4 - T_3}{T_5 - T_2}\right)} \quad (17)$$

Au niveau de la pompe de solution

Le pompage de la solution ne consomme qu'une petite quantité d'énergie par rapport aux autres quantités de chaleur mises en jeu dans le système. Bien que l'existence de la pompe de solution puisse être ignorée lors de l'établissement du bilan, l'expérience montre que la pompe est un composant critique qui doit être soigneusement conçu [16]. La puissance consommée par cette pompe peut être estimée par :

$$\dot{W}_{SP} = \dot{m}_1 v_1 \frac{p_2 - p_1}{\eta_{SP}} \quad (18)$$

Cette quantité peut aussi être calculée par :

$$\dot{W}_{SP} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1) \quad (19)$$

Au niveau de la vanne de détente

Une vanne de détente est un composant qui réduit la pression et divise deux niveaux de pression différents. Dans un modèle simple d'un système de réfrigération à absorption à simple effet, on suppose que le changement de pression se produit uniquement au niveau de la vanne de détente et de la pompe de solution. Il n'y a pas de chaleur ajoutée ou retirée du fluide de travail au niveau du détendeur. L'enthalpie du fluide de travail reste la même des deux côtés.

IV. Etude comparative entre une installation à absorption et une machine conventionnelle à compression de vapeur :

En plus du modèle de la machine à absorption, un modèle simple d'une machine à compression de vapeur est considéré basé sur un COP prédéterminé reliant la capacité frigorifique obtenue à la puissance motorisant le système conventionnel par le biais de la relation suivante :

$$COP_{conventional} = \frac{Q_e}{\dot{W}_{conventional}} \quad (20)$$

Pour le calcul économique, on considère une puissance unitaire de 7 kW (24000 btu) et une agglomération de 700 foyers pour un temps de fonctionnement donné.

Chapitre III : Etude comparative entre une machine à absorption et une machine conventionnelle dans le cadre de la climatisation urbaine.

Les coûts de consommation et les dégagements de CO₂ sont évalués à une base de tarification 4.42 dinars et un dégagement de 0.49 kg de CO₂ pour chaque kWh.

$$C_{global} = C_{kWh} \dot{W}t \quad (21)$$

$$M_{CO_2} = M_{uCO_2} \dot{W}t \quad (22)$$

La *figure III.2* illustre l'influence de la température de désorption sur les quantités de chaleur mises en jeu aux différents coins de l'installation. Il est certain que l'augmentation de cette température est bénéfique quant à l'accélération du processus de désorption. Toutefois, on constate que cette même augmentation induit de façon inévitable une hausse des quantités de chaleur au niveau de l'absorbeur et du condenseur qu'il est impératif d'évacuer en utilisant des systèmes de rejet de chaleur plus grands et donc plus encombrants.

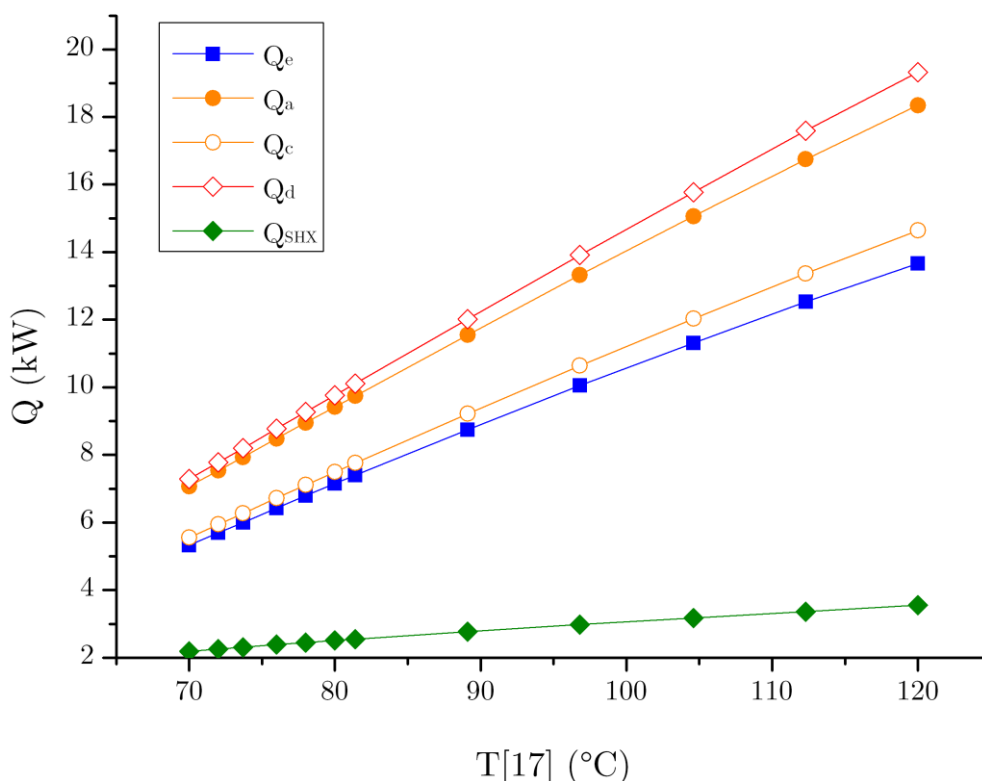


Figure III.2 : Influence des quantités de chaleur mises en jeu.

La *figure III.3* illustre l'influence de la température de rejet de chaleur au niveau de l'absorbeur sur la puissance frigorifique et le COP_{abs}. Il est à constater qu'à la différence de

Chapitre III : Etude comparative entre une machine à absorption et une machine conventionnelle dans le cadre de la climatisation urbaine.

l'influence de la température de désorption, l'augmentation de la température de rejet de chaleur dans un intervalle compris entre 15 °C et 35 °C, les pressions de travail évoluent de façon proportionnelle. Quant à la valeur du COP_{abs} , on relève une diminution dans un intervalle compris entre 0.654-0.493 avec une valeur maximale pour 15 °C. Dans ce même contexte, l'influence de la température du fluide de refroidissement agit de façon similaire sur la capacité frigorifique qui diminue de façon identique que le COP_{abs}

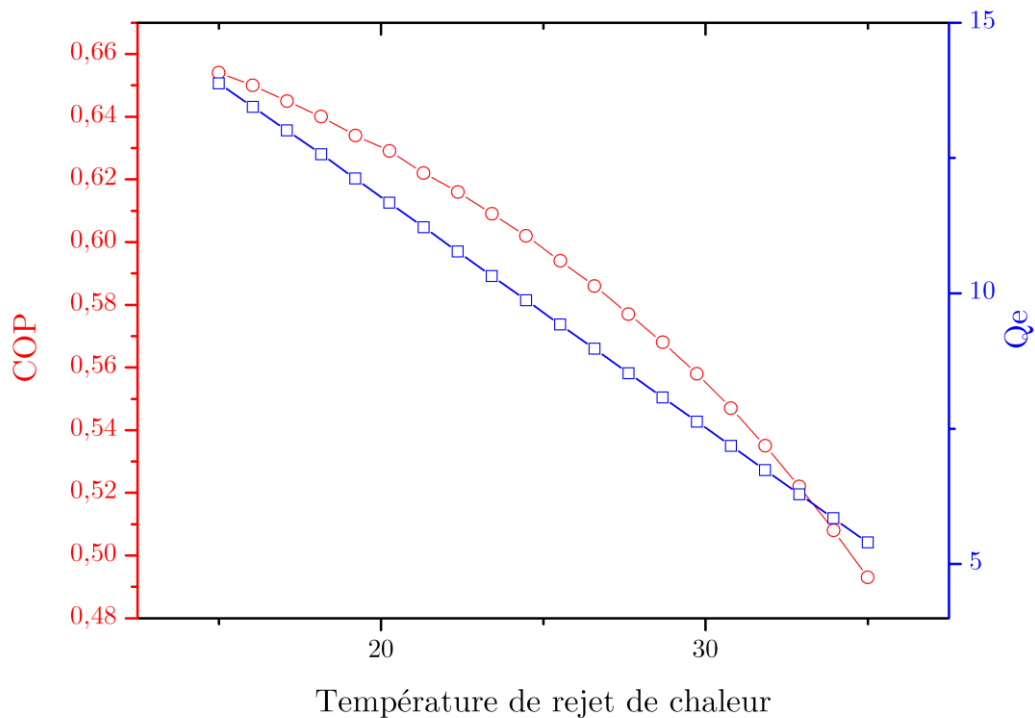


Figure III.3: Influence de la température de rejet de chaleur sur le COP et la capacité frigorifique.

V. Influence de la performance du système conventionnel sur le coût et les dégagements de CO₂ :

Les systèmes commercialisés diffèrent selon leurs performances. L'influence du coût de fonctionnement s'en trouve directement affecté alors que l'utilisation d'une centrale de génération d'eau froide n'est pas assujettie à de telles perturbations. La figure III.4 illustre la variation du coût de fonctionnement et les dégagements de CO₂ équivalents en fonction du COPc de la machine conventionnelle utilisée en envisageant des conditions extrêmes de fonctionnement. On constate que les climatiseurs de haute performance qui réalisent des

Chapitre III : Etude comparative entre une machine à absorption et une machine conventionnelle dans le cadre de la climatisation urbaine.

COPc avoisinant 5 peuvent réduire de moitié le coût de fonctionnement et par conséquent l'énergie dépensée à cet effet. Le constat est le même vis-à-vis des dégagements de CO₂ qui se trouvent réduits de moitié.

Les coûts de fonctionnement des machines conventionnelles est très élevé par rapport à une centrale de climatisation à absorption. Toutefois, ces dernières nécessitent des chaleurs de génération énormes pour motoriser le cycle et des systèmes de rejet de chaleur. Les frais sont immédiats et constituent le principal handicap à recourir à de telles solutions surtout en Algérie où le coût d'électricité est subventionné.

Un autre aspect qui est spécifique à un modèle de consommation basé sur les systèmes individuels à compression est l'incontrôlabilité des charges de consommation ce qui induit à des blackouts pendant la saison chaude.

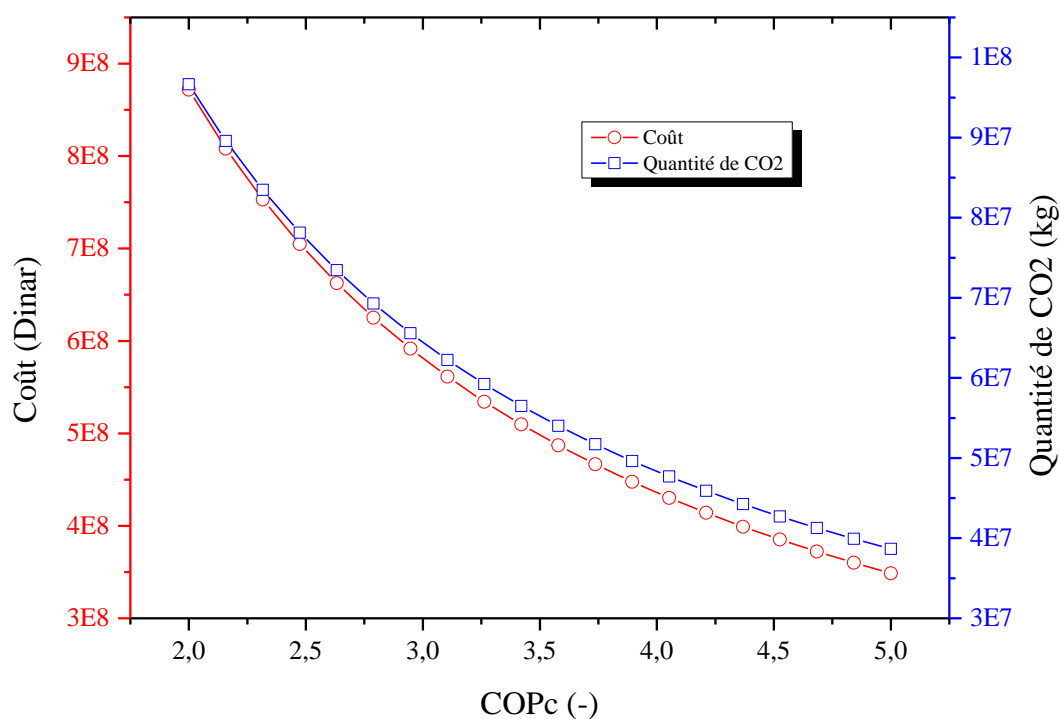


Figure III.4 Influence du COPc sur le coût et les dégagements de CO₂.

Chapitre III : Etude comparative entre une machine à absorption et une machine conventionnelle dans le cadre de la climatisation urbaine.

La figure III.5 illustre une comparaison entre la puissance frigorifique et de génération en fonction de la température. A la même température on remarque que la puissance de génération est supérieure à la puissance frigorifique. Dans l'intervalle de [80 °C – 100 °C] on remarque une faible augmentation de la puissance frigorifique [3500kwh-5700kwh] par contre dans le même intervalle une importante augmentation de la puissance de génération entre [4500kwh-7200kwh] .

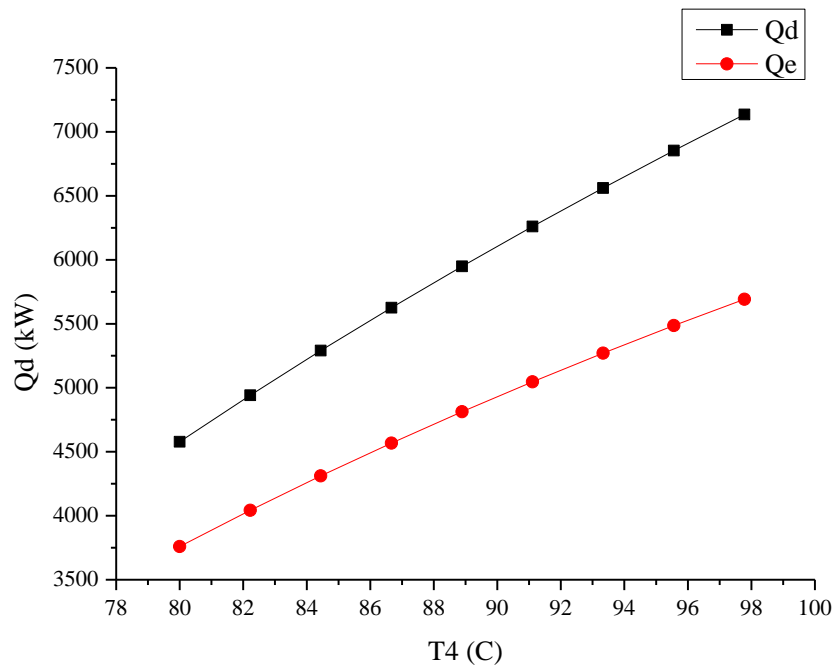


Figure III.5 : Comparaison entre la puissance frigorifique et de génération.

La figure III.6 illustre l'influence de la température $T(4)$ sur l'évolution du coût et les dégagements de CO_2 . A l'augmentation de la température on observe un allongement de la quantité de CO_2 dégager. Toutefois, on constate que cette même augmentation provoque un accroissement du coût conventionnel.

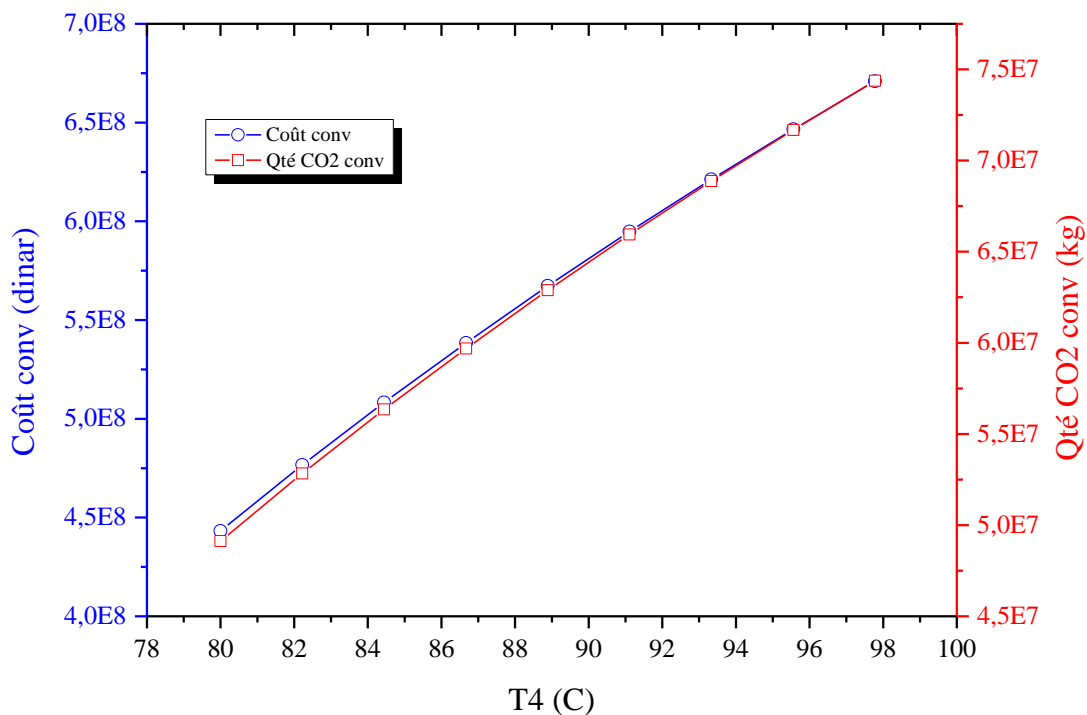


Figure III.6 Evolution du coût et des dégagements de CO_2 en fonction de la température de génération.

Conclusion générale

Les études à l'échelle du globe montrent que la consommation énergétique dans le domaine la climatisation se situe actuellement selon les pays aux alentours de 30 à 40% de la consommation totale. Cette consommation forte inégalement répartie dans le monde faisant largement appel aux combustibles fossiles, qui sont des ressources non renouvelables, (les scénarios optimistes prévoient l'épuisement des ressources en pétrole et en gaz à la fin du XXI^e siècle, on comprend la nécessité de passer à l'utilisation des ressources renouvelables.

L'intérêt principal de ce travail est de contribuer à une meilleure compréhension des processus de maîtrise d'énergie en Algérie.

Les conclusions tirées des trois chapitres analysés montrent que les systèmes de chauffage et de refroidissement urbains ont un fort potentiel pour devenir des options viables de fourniture de chaleur et de froid dans un monde futur. Toutefois, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour identifier, évaluer et mettre en œuvre ces potentiels afin de récolter les bénéfices globaux du chauffage et du refroidissement urbains.

Il reste énormément de chemin à parcourir car ce concept n'en est qu'à ses débuts. Nous pensons que l'utilisation de cette technologie transformera le visage de la climatisation dans notre pays .

Enfin, nous souhaitons vivement que ce projet peut servir comme un élément de base pour d'autres études plus approfondies pour faire intégrer sous des systèmes plus complexes.

Références

- [1] J. P. Praene, O. Marc, F. Lucas et F. Miranville, «Simulation and experimental investigation of solar absorption cooling system in Reunion Island,» *Applied Energy*, vol. 88, n° 13, pp. 831-839, 2011.
- [2] «World energy outlook 2012,» Internal Energy Agency, 2012.
- [3] J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell et C. A. Johnson, «*IPCC, 2001, Climate change 2001: the scientific basis, Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change.*» Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2001.
- [4] D. S. Kim et C. A. Infante Ferreira, «Solar refrigeration options – a state-of-the-art review,» *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, n° 11, pp. 3-15, 2008.
- [5] H. M. Henning, «Solar assisted air conditioning of buildings – an overview,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, n° 110, pp. 1734-1749, 2007.
- [6] B. Choudhury, P. K. Chatterjee et J. P. Sarkar, «Review paper on solar-powered air-conditioning through adsorption route,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n° 18, pp. 2189-2195, 2010.
- [7] H. Z. Hassan et A. A. Mohamad, «Renewable and Sustainable Energy Reviews,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n° 17, pp. 5331-5348, 2012.
- [8] P. Lamp et F. Ziegler, «European research on solar-assisted air conditioning,» *International Journal of Refrigeration*, vol. 21, n° 12, pp. 89-99, 1998.
- [9] Kabouche Azouz, simulation sous TRNSYS16.1 d'un appartement d'une tour multifonctionnelle a constantine, diplôme de magistère, université MENTOURI, juin 2012 20/04/2020.

Références

- [10] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/district-energy> 22/04/2020 .
- [11] <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/elements-contexte/impacts-environnementaux> 07/05/2020.
- [12] <https://www.empower.ae/php/what-is-district-cooling.php?id=2> 24/05/2020.
- [13] HEAT TRANSFER A Series of Reference Books and Textbooks Series editor Afshin J. Ghajar 13/06/2020.
- [14] PDF: heat transfer (Boca Raton Fla.) 15/06/2020.
- [15] Woodhead Publishing Series in Energy: Number 87 Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems Edited by Robin Wiltshire 26/06/2020.
- [16] *MENA ENERGY SERIES / REPORT NO, 105360 - MNA.*
- [17] <https://owl-ge.ch/travaux-d-eleves/2011-2012/article/impact-de-la-consommation-d-energie-sur-l-environnement> 05/07/2020.
- [18] <https://www.empower.ae/php/what-is-district-cooling.php?id=2> 16/07/2020.
- [19] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-energies-renouvelables> 16/07/2020 .
- [20] HEAT TRANSFER A Series of Reference Books and Textbooks Series editor Afshin J. Ghajar 17/07/2020.
- [21] S. Tredinnick*, G. Phetteplace *Burns & McDonnell, Inc., Downers Grove, IL, USA; GWA Research LLC, Lyme, NH, USA, District cooling, current status and 8 future trends 14/09/2020.
- [22] ASHRAE Research Project RP-1267, under the auspices of ASHRAE Technical Committee 6.2, District Energy, and Special Project 97 26/07/2020.
- [23] K. Church Natural Resources Canada, Ottawa, on Canada 14/09/2020.
- [24] Woodhead Publishing Series in Energy: Number 87 Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems Edited by Robin Wiltshire 27/07/2020.
- [25] Energy sources for district heating 6 and cooling K. Church Natural Resources

Références

Canada, Ottawa, ON, Canada 14 /09/2020.

[26] <https://www.explorateurs-energie.com/index.php/les-energies/geothermique>
01/08/2020 .

[27] <https://www.abcclim.net/geothermie-introduction.html> 01/08/2020.

[28] Energy sources for district heating 6 and cooling K. Church Natural Resources
Canada, Ottawa, ON, Canada 18/09/2020.

[29] Co-Authors: Roopesh Pushpala Graduate Research Assistant University of
Minnesota, CURA, Biomass for Cooling System Technologies: A Feasibility Guide, mai
2016 14/08/2020.

[30] Energy sources for district heating 6 and cooling K. Church Natural Resources
Canada, Ottawa, ON, Canada 19/09/2020.