

LA CLIMATISATION SOLAIRE

Thermique ou photovoltaïque

Clima+confort & www.climaplusconfort.fr

L'offre d'information bimédia des professionnels
du génie climatique



8 numéros par an

- **Des enquêtes marchés** pour une approche ciblée auprès de vos clients.
- **Des dossiers complets** sur les meilleures solutions pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.
- **L'actualité marquante** de la profession détaillée et analysée : réglementation, formation, etc...



À tout moment sur www.climaplusconfort.fr avec vos codes d'accès

- **Un accès aux ressources métiers** en illimité à des documents de référence (textes législatifs, bases documentaires multimédia, schémas techniques, ...).
- **Des dossiers d'experts** délivrés par des professionnels reconnus : des cas concrets, des retours d'expériences, etc.
- **Tous les articles archivés** de Clima+confort.
- **Une base de données** produits et services et un annuaire Pro.

Pour vous abonner, rendez-vous sur www.climaplusconfort.fr/Boutique
ou contactez-nous au 01 53 26 48 00

Francis Meunier
Daniel Mugnier



LA CLIMATISATION SOLAIRE

Thermique ou photovoltaïque

DUNOD

Illustration de couverture : © Tecsol

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2013
ISBN 978-2-10-058206-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Remerciements	VIII
Préface de Hans-Martin Henning	IX
Préface d'André Joffre	XI
Introduction	1
Chapitre 1 : Contexte et enjeux	3
1.1 Climatisation passive/climatisation active	4
1.2 La climatisation dans les bâtiments à très basse consommation voire à énergie positive	7
1.3 Rappel historique de la climatisation solaire en France	14
1.4 Différentes filières de froid renouvelable	20
1.5 Le froid solaire	21
Chapitre 2 : La problématique de la climatisation solaire thermique	29
2.1 Étude de cas de climatisation solaire d'un bâtiment public	29
2.2 Le gisement solaire	50
2.3 Les capteurs solaires	54
2.4 Seconde étude de cas de climatisation solaire d'un groupe de bâtiments	63
2.5 Les grandes classes de systèmes de production du froid pour le froid solaire thermique	72
2.6 Climatisation avec booster solaire	76

Chapitre 3 : Les systèmes hermétiques à sorption de production du froid	79
3.1 L'absorption liquide	79
3.2 L'adsorption	96
3.3 Comparaison des systèmes commercialisés à absorption et à adsorption	110
3.4 Les kits de climatisation solaire thermique	112
Chapitre 4 : Les cycles ouverts de production du froid	117
4.1 Le cycle ouvert à dessiccation en climat tempéré	122
4.2 Le cycle ouvert de climatisation à dessiccation en climat tropical humide	133
Chapitre 5 : Des choix technologiques importants	139
5.1 Influence de la technologie de captation de l'énergie solaire	141
5.2 Influence de la technologie de distribution d'eau glacée	142
5.3 Influence de la technologie du rejet thermique	145
5.4 Comparaison de deux cas résultant d'une bonne et d'une mauvaise itération	148
5.5 Air conditionné/rafraîchissement	151
Chapitre 6 : La climatisation solaire photovoltaïque	155
6.1 Un principe simple <i>a priori</i>	156
6.2 Une réalité plus complexe	157
6.3 Des perspectives ambitieuses pour la climatisation solaire PV	161
6.4 Quelle gamme de puissances pour la climatisation solaire PV ?	162
Chapitre 7 : Les installations de climatisation solaire thermique de forte puissance	165
7.1 UWC Singapour	165
7.2 DMHS (Desert Mountain High School)	173

Chapitre 8 : Autres solutions de climatisation renouvelable	175
8.1 La climatisation géothermique	175
8.2 La climatisation par valorisation des rejets thermiques	185
8.3 La climatisation par valorisation de la chaleur renouvelable provenant de la biomasse ou des déchets	185
Chapitre 9 : La réfrigération solaire	191
9.1 La conservation par la réfrigération solaire thermique	192
9.2 La conservation par la réfrigération solaire photovoltaïque	203
9.3 Un produit nouveau : Solar Cool	208
Chapitre 10 : Impact environnemental des systèmes de froid renouvelable	209
10.1 Énergie primaire, kWh _{ep} et énergie finale	210
10.2 Émissions de CO ₂	211
10.3 Comparaison de différents scénarios de froid renouvelable avec appoint	212
10.4 Consommation de matière, économie circulaire, analyse de cycle de vie	221
Chapitre 11 : Conclusion et perspectives	223
11.1 La climatisation solaire thermique	224
11.2 La climatisation solaire photovoltaïque	227
11.3 La climatisation renouvelable thermique hors solaire	228
11.4 La réfrigération solaire	229
11.5 Enjeux	230
Chapitre 12 : Compétition entre eau chaude sanitaire (ECS) et climatisation solaires	235
Index	241

Remerciements

Pour la rédaction de cet ouvrage, les auteurs ont bénéficié de l'accès à certains documents de très grande qualité qu'ils tiennent à mentionner et pour lesquels ils expriment leurs remerciements.

Le Guideline du projet européen SOLAIR (www.solair-project.eu/122.0.html) a été très utile grâce à l'aimable accord de la part de l'auteur principal de ce document : Edo Wiemken, Fraunhofer ISE.

L'ouvrage, en cours de parution, *Solar Cooling Handbook, A Guide to Solar Assisted Cooling and Dehumidification Processes* (ISBN 978-3-7091-0841-3) par H.-M. Henning, Mario Motta, Daniel Mugnier (Eds.) a été également très précieux.

Préface de Hans-Martin Henning

Pourquoi utiliser l'énergie solaire pour la climatisation des bâtiments ? Tout d'abord, cette technologie fascine les utilisateurs : elle semble magique pour transformer l'énergie solaire en refroidissement.

Les principaux arguments pour la climatisation solaire proviennent des économies d'énergie :

- ▶ L'application de la climatisation solaire économise de l'électricité et donc des ressources énergétiques conventionnelles sous forme d'énergie primaire.
- ▶ La climatisation solaire conduit également à une réduction de la demande de pointe en électricité, ce qui est un avantage pour le réseau d'électricité. Elle a en plus le potentiel de mener à des économies de coûts supplémentaires en termes de puissance pour la production d'électricité de pointe lorsqu'elle est appliquée sur une large échelle.
- ▶ Les technologies de climatisation solaire, notamment *via* l'énergie solaire thermique, utilisent des matériaux respectueux de l'environnement, n'appauvrissant pas la couche d'ozone et n'ayant aucun potentiel (ou très peu) de réchauffement climatique.

D'autres arguments proviennent d'un point de vue plus technique :

- ▶ L'énergie solaire est disponible presque en même temps que la climatisation est nécessaire ; cet argument vaut pour les deux approches, la voie solaire thermique et la voie solaire photovoltaïque.
- ▶ Les systèmes solaires thermiques utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage ont de grandes surfaces de capteurs qui, souvent, ne sont pas entièrement utilisées au cours de l'été. Elles peuvent être utilisées pour la climatisation et ainsi réduire les risques de situations de stagnation de l'installation de capteurs solaires.
- ▶ La climatisation alimentée par voie thermique fait appel à des machines produisant peu de bruits et permettant un fonctionnement sans vibrations.

Après quinze ans de nombreuses activités et recherches dans le domaine de la climatisation solaire, en particulier au sein du programme Solar Heating & Cooling de l'AIE, mais aussi dans de nombreux projets de R&D nationaux et européens, la pénétration du marché de la climatisation par le solaire reste faible.

Par conséquent, il est important de se pencher sérieusement sur les réalisations et l'état actuel de la technologie de climatisation solaire. Il est également important de comprendre les perspectives d'avenir de cette technologie et d'identifier les meilleures conditions pour son développement et son épanouissement.

Ce livre vise à fournir une vue d'ensemble de cette technologie fascinante tout en restant sans concession ni complaisance.

Hans-Martin Henning

Deputy Director au sein de l'Institut Fraunhofer pour l'énergie solaire
(Fraunhofer ISE Energy Systems) à Fribourg-en-Brisgau (Allemagne)

Préface d'André Joffre

Qui ne se prend pas à rêver ou n'est pas surpris lorsqu'on lui parle de faire du froid grâce à l'énergie solaire, qui plus est l'énergie solaire thermique ? C'est bien cependant ce qui a été réalisé il y a plus de 20 ans en Catalogne, à un vol d'oiseau de la frontière espagnole dans la célèbre ville de Banyuls-sur-Mer, où cette ressource inépuisable qu'est le soleil produit les si rares vins de Banyuls.

Depuis 1992, une cave est rafraîchie par le seul moteur solaire et l'installation n'a pris aucune ride, preuve en est que la climatisation solaire est une réalité technique pérenne et durable. L'application de l'énergie solaire, qui plus est thermique, a été et est plus que jamais un enjeu majeur du développement de cette source d'énergie. Au-delà de l'adéquation évidente entre ressource et besoins, le couplage solaire et climatisation revêt l'avantage indéniable de valoriser un champ de capteurs solaires tout au long de l'année dans la partie sud de l'Hexagone sans se soucier de risques de surchauffes à la fois préjudiciables au niveau technique et signe d'une valorisation de la ressource limitée.

Depuis le début des années 1980, la France joue un rôle d'avant-garde dans le secteur de la climatisation solaire et de nombreuses avancées et expériences et de nombreux projets ont été menés.

Quel bilan en 2012 pour la climatisation solaire ? Cet ouvrage permet de faire le point et l'on voit que la filière historique utilisant l'énergie solaire thermique a fait de gros progrès techniques avec des systèmes précommerciaux disponibles et fiables, de la petite à la forte puissance. Cependant, il apparaît que le bât blesse au niveau économique actuellement, surtout pour les petites puissances que l'on rêvait de développer pour le secteur résidentiel et petit tertiaire du sud de la France et dans les DOM.

En revanche, de façon presque symétrique, la filière consistant en un couplage photovoltaïque et un groupe à compression de vapeur fait de plus en plus sens au niveau économique alors que les développements techniques pour un couplage direct et dans une stratégie d'autoconsommation en sont encore à leurs balbutiements.

La climatisation solaire va-t-elle devenir un terme banal du langage courant dans quelques années, faisant la nique aux produits actuels énergivores et perturbateurs en période estivale vis-à-vis des réseaux électriques du sud de l'Europe et dans toutes les parties du monde riches en soleil ?

Si oui, qui va remporter la mise entre les deux voies, celle thermique et celle photovoltaïque ?

Nul ne peut le dire avec certitude actuellement, notamment au regard des applications et des niveaux de puissance mais une chose est certaine : l'avenir de la climatisation solaire sera ensoleillé !

André Joffre
PDG de Tecsol

Introduction

Dans un contexte de raréfaction du pétrole, de renchérissement du nucléaire et de dérèglement climatique, les efforts de réduction de consommation d'énergie primaire (gaz, fioul, électricité) dans le bâtiment vont être intensifiés par le développement des bâtiments à basse consommation (BBC) ou à énergie positive (BEPOS). De plus, l'Europe s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre et le bâtiment constitue une des cibles principales de réduction. Or, paradoxalement, ces nouveaux bâtiments ont besoin de climatisation. À titre d'exemple, dans un bâtiment nnZEB (nearly net Zero Energy Building) construit au Danemark, les besoins en climatisation représentent 24 % du total de l'énergie primaire contre seulement 8 % pour le chauffage ! La climatisation solaire constitue donc une ressource par laquelle les professionnels du bâtiment se devront de plus en plus de passer pour obtenir les nouveaux labels (BBC ou autres) toujours plus exigeants auxquels les promoteurs tiennent beaucoup. De plus, elle permettra d'effacer la pointe estivale de consommation électrique.

C'est avec cette nouvelle vision que notre ouvrage est conçu. Il s'adresse d'une part à des étudiants engagés dans des formations professionnalisantes en énergétique et génie civil (à partir de la licence pour le LMD ou de la première année dans les écoles d'ingénieurs) et d'autre part à des professionnels à la recherche de connaissances dans ce domaine émergent et encore mal connu.

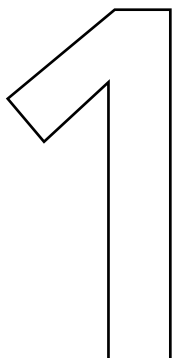
Pour les bases de l'énergétique, nous renvoyons à des ouvrages existants, limitant notre contribution aux aspects spécialisés de la climatisation solaire et plus généralement du froid renouvelable. En effet, si la climatisation solaire attire plus particulièrement l'attention, il ne faut oublier ni les autres énergies renouvelables (géothermie, valorisation des déchets, biogaz, etc.) ni les applications de conservation alimentaire ou industrielles, notamment pour les pays en voie de développement, où les énergies renouvelables ont leur mot à dire.

Pour la climatisation solaire, il existe deux grandes filières : une filière thermique et une autre électrique (*via* le photovoltaïque). Dans le long terme, il n'est pas certain que ces deux filières survivent mais, aujourd'hui, il n'est pas possible de parier sur l'une plutôt que sur l'autre. C'est la raison pour laquelle ces deux filières sont abordées même si les spécificités de la climatisation solaire thermique exigent de plus longs développements que la climatisation photovoltaïque, qui n'a pas encore été

développée significativement à l'échelle commerciale. Cependant, l'énergie solaire n'est pas la seule ressource renouvelable, ainsi, pour la filière thermique, nous mentionnons la ressource géothermique ainsi que la biomasse et la valorisation des déchets. Une allusion est faite également au développement d'installations frigorifiques de conservation alimentaire. Enfin, le véritable impact environnemental, incluant les émissions de gaz à effet de serre, de ces filières est abordé.

Alors que le marché de la climatisation solaire est encore balbutiant, notamment pour des raisons de coût, les auteurs font des recommandations sur ce qui leur semble le meilleur choix suivant les conditions climatiques et de puissances des installations à concevoir.

La participation de deux auteurs, l'un académique (Francis Meunier) et l'autre professionnel (Daniel Mugnier) permet d'aborder tous les aspects (bases, réalisation et exploitation) de ce domaine. Le point de vue économique est également abordé en intégrant le rôle des incitations et en présentant trois études de cas réelles.



Contexte et enjeux

Après une présentation du contexte de transition énergétique, de réchauffement climatique et de tendance vers des bâtiments à très basse consommation, voire à énergie positive, il est rappelé que les besoins de climatisation ne cessent de croître. La climatisation passive ne peut pas, à elle seule, répondre à tous ces besoins et la climatisation solaire, qui a déjà fait ses preuves, constitue une alternative vouée *a priori* à un bel avenir.

L'augmentation de la consommation mondiale d'énergie, la raréfaction de certaines sources d'énergie fossile bon marché, comme le pétrole conventionnel, et l'incertitude planant sur l'avenir du nucléaire font de la transition énergétique un sujet de grande actualité. À ces considérations, il faut ajouter les inquiétudes dues au dérèglement climatique avec la sombre certitude que, au rythme de nos émissions de gaz à effet de serre, le réchauffement climatique va atteindre la valeur symbolique très inquiétante des 2 °C vers 2050 et que, sans inflexion urgente de la stratégie énergétique mondiale actuelle, le risque est considérable de perdre le contrôle du climat à venir. Dans ces perspectives, les énergies renouvelables (ENR) sont appelées à jouer un rôle important pour deux raisons :

- ▶ elles offrent une sécurité d'approvisionnement énergétique pour l'avenir ;
- ▶ elles contribuent fortement à limiter le dérèglement climatique.

Plusieurs éléments concourent à inciter à une transition énergétique dans laquelle la part des ENR sera plus importante :

- ▶ la consommation mondiale d'énergie, tirée par les pays émergents croît alors que les ressources fossiles non renouvelables sont finies et limitées ;
- ▶ après Fukushima, l'avenir du nucléaire est incertain et son expansion est, dans l'immédiat, stoppée. De plus, les nouvelles mesures de sécurité imposées, suite à la catastrophe, entraînent un renchérissement de cette filière ;
- ▶ enfin, des mesures drastiques de limitation des émissions de CO₂ devront être prises rapidement dès la sortie de la crise économique qui, pour l'instant, fait

passer au second plan le problème, pourtant crucial, du réchauffement climatique.

Il est généralement admis que l'on est entré dans une ère où le coût de l'énergie va augmenter. L'irruption des combustibles fossiles non conventionnels tels que les schistes bitumineux pour le pétrole ou le gaz de schiste peut freiner le renchérissement mais, leurs coûts d'extraction étant très élevés, ces combustibles ne sont rentables que si l'énergie est chère (typiquement un coût du baril nettement supérieur à 80 \$).

Dans ces conditions, toutes les alternatives aux énergies fossiles et à l'énergie nucléaire sont à prendre en considération. L'énergie solaire (ES) constitue une solution très appréciée. Néanmoins, il ne faut pas sous-estimer les inconvénients très souvent mis en avant à l'encontre de l'énergie solaire :

- ▶ son intermittence et sa variabilité ;
- ▶ le coût d'investissement élevé des matériels permettant sa valorisation.

Heureusement, afin de pallier les inconvénients liés à l'intermittence et à la variabilité de l'énergie solaire, des solutions techniques, qui seront présentées dans cet ouvrage, existent. En ce qui concerne les coûts d'investissement des technologies de l'ES, ils continuent à être élevés et, s'ils constituent encore aujourd'hui le principal obstacle au déploiement à grande échelle de cette technologie, il ne faut pas sous-estimer leur tendance baissière liée à la forte expansion du marché mondial tiré notamment par la Chine.

Dans ces conditions, il devient possible d'envisager que, dans quelques années, le solaire en général et la climatisation solaire en particulier soient totalement compétitifs par rapport aux autres technologies. Toutes ces raisons concourent à inciter à étudier les possibilités actuelles et dans un futur proche de l'utilisation de la climatisation solaire. C'est cette problématique qui va être abordée dans cet ouvrage en apportant des réponses à la question cruciale : dans quelles conditions la solution de la climatisation solaire est-elle viable ? Sans négliger de répondre à la question : dans quel cas faut-il éviter la climatisation solaire en raison de son inadaptation ?

1.1 Climatisation passive/climatisation active

Avant de rentrer plus dans la climatisation solaire, il faut d'abord se poser la question : la climatisation est-elle indispensable ? La climatisation passive n'est-elle pas suffisante ? De fait, dans un passé pas si lointain, on se passait de climatisation en ayant recours à des techniques, dites passives, de ventilation, protection contre le soleil, arrosage, etc. La climatisation a été fortement développée aux États-Unis dès le début du xx^e siècle, initialement, durant l'entre-deux-guerres, dans l'industrie

1.1 Climatisation passive/climatisation active

(notamment parce que le rendement des ouvriers au travail était meilleur dans les ateliers climatisés que dans les non climatisés) et dans le commercial (grands magasins, cinémas, etc.). La pénétration dans le résidentiel ne s'est produite qu'après la Seconde Guerre mondiale. Ces développements de la climatisation se sont ensuite étendus progressivement à toute la planète. Aujourd'hui, c'est un secteur en progression dans tous les pays malgré les crises économiques. Néanmoins, avec le renchérissement du coût de l'énergie et avec les menaces que fait peser l'effet de serre, des voix de plus en plus nombreuses se font entendre pour limiter le recours à la climatisation en préconisant le retour à la climatisation passive.

Afin d'illustrer les possibilités ainsi que les limites de la climatisation passive, nous allons considérer quatre cas :

- ▶ les centres de calcul (*data centers*) ;
- ▶ la climatisation passive *via* des boucles d'eau (de mer, lac ou rivière) ;
- ▶ les bâtiments à basse consommation (BBC ou même zéro énergie ou énergie positive) ;
- ▶ le refroidissement adiabatique par pulvérisation d'eau.

1.1.1 Les centres de calcul : un cas très favorable à la climatisation passive

Les centres de calcul ont une consommation d'électricité très importante. Or, dans cette consommation, la climatisation joue un rôle important. Dans un souci de réduction de leur facture électrique ainsi que de leur empreinte carbone, les centres de calcul se sont intéressés à réduire le recours à la climatisation. C'est ainsi que l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers) a publié un document étudiant la part de la climatisation qui pourrait être couverte par la climatisation passive au travers d'une simple ventilation d'air extérieur. En France, d'après l'ASHRAE, les centres informatiques, dotés d'équipements certifiés pour la classe A2, peuvent être refroidis 97 % du temps grâce à l'air froid extérieur à une température oscillant entre 15 °C et 32 °C et un taux d'hygrométrie variant de 20 % à 80 %. Les équipements certifiés pour les classes A3 et A4 tolèrent des plages de température et d'humidité encore plus étendues (respectivement 5-40 °C et 8-85 % HR pour la classe A3 et 5-45 °C et 8-90 % HR pour la classe A4).

Ce résultat est particulièrement éloquent et prouve à quel point il est indispensable de populariser l'idée de la climatisation passive et de ses possibilités.

La conséquence importante de cette remarque est que, en France métropolitaine, lorsque le matériel informatique a été bien sélectionné, il n'est pas besoin de climatiser les salles informatiques à partir d'eau glacée à 7 °C. Un simple

rafraîchissement passif par ventilation suffit. Dans le cas de tours où les salles informatiques sont aveugles et où la ventilation nocturne est moins efficace, un rafraîchissement à partir d'eau glacée à haute température 14-20 °C est possible. Pour les immeubles de bureaux climatisés à l'aide de réseaux urbains de froid, soit la ventilation suffit, soit l'utilisation de l'eau glacée du retour entre 12 et 18 °C peut être utilisée. Ce point est important car la climatisation des salles informatiques à partir d'eau glacée à 7 °C a tendance à augmenter alors qu'elle n'est pas justifiée.

1.1.2 Les boucles d'eau

Dans l'exemple précédent des centres de calcul, la climatisation passive est assurée au travers de la ventilation d'air extérieur et cette technique est limitée, pour d'autres applications que les centres de calcul, aux heures où l'air extérieur n'est pas trop chaud. L'utilisation du sous-sol *via* les puits provençaux est parfois pratiquée. Ici, nous allons présenter un autre concept de climatisation passive en ayant recours à de l'eau accessible dans une rivière, un lac ou la mer.

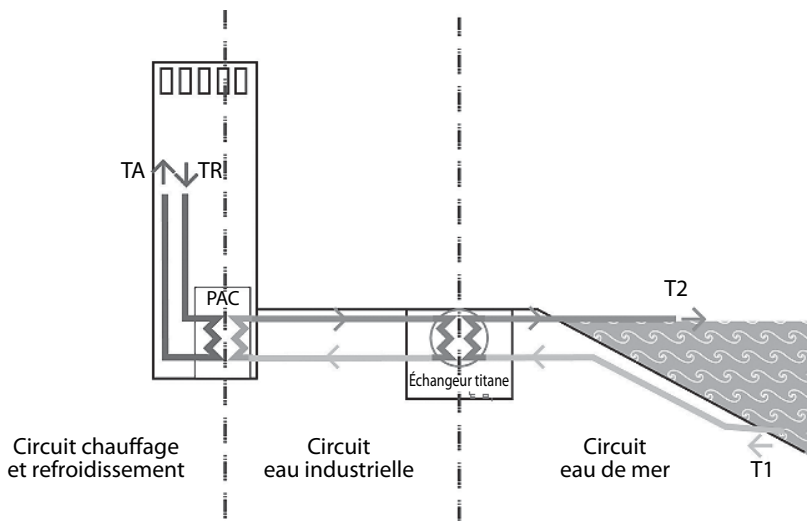


Figure 1.1 Schéma de principe d'une boucle d'eau avec échangeur intermédiaire au titane (source : Rapport final DEF, PACA, 2011).

Certes, ce concept ne concerne que les villes situées au bord d'une rivière, d'un lac ou de la mer, mais force est de reconnaître que la majorité des grandes villes satisfont à ce critère. Ainsi, pour les villes au bord de la mer Méditerranée, en allant puiser l'eau de mer à quelques centaines de mètres du rivage et à 50 m de profondeur (figure 1.1), on obtient de l'eau proche de 15 °C tout au long de l'année. La boucle

1.2 La climatisation dans les bâtiments à très basse consommation

d'eau ainsi formée sert ensuite à alimenter des boucles d'eau reliées aux immeubles qui peuvent :

- ▶ fournir du « *free cooling* » ;
- ▶ être utilisées comme source de rejet thermique pour faire fonctionner un groupe refroidisseur de liquide pour la climatisation avec un excellent COP grâce à la basse température de rejet thermique.

De plus, dans nos climats tempérés, cette boucle d'eau peut être utilisée en hiver pour faire fonctionner une pompe à chaleur.

Remarque

Le rejet de l'eau de mer est effectué en surface afin de limiter les impacts pour la biodiversité.

À Paris, le réseau de froid urbain Climespace utilise, pour certaines de ses centrales de production d'eau glacée, l'eau de la Seine comme source de refroidissement et, en hiver, lorsque l'eau de la Seine est inférieure à 8 °C, elle est utilisée dans son réseau d'eau glacée. Dans un tel réseau de froid urbain, une autre gestion, à plus haute température, de l'eau glacée permettrait de profiter du « *free cooling* » sur des périodes plus longues. Le problème des fleuves comme la Seine (et éventuellement le Rhône ou la Loire) est qu'ils sont déjà l'objet de beaucoup de rejets thermiques et que les autorisations pour ces rejets sont de plus en plus difficiles à obtenir.

Néanmoins, cette piste de climatisation passive par des boucles d'eau ne doit pas être négligée car, éventuellement, couplée avec l'utilisation du sous-sol, elle offre des perspectives intéressantes afin de limiter voire remplacer la climatisation active.

1.2 La climatisation dans les bâtiments à très basse consommation voire à énergie positive

Compte tenu des efforts pour réduire la consommation d'énergie pour le chauffage dans les bâtiments à très basse consommation, on pourrait s'attendre à ce que ceux-ci présentent des conditions idéales pour y pratiquer la climatisation passive. En fait, paradoxalement, le retour d'expérience sur ces bâtiments conduit à la conclusion opposée. Les charges thermiques pour le chauffage de ces bâtiments sont fortement réduites, en revanche les charges frigorifiques pour la climatisation augmentent (tableau 1.1). Sans climatisation, la température excéderait largement

26 °C (température minimale réglementaire) pendant les périodes chaudes de l'été. Les raisons pour cet état de fait sont simples et multiples :

- ▶ les apports solaires bien utilisés en hiver limitent les besoins de chauffage alors que, malgré les protections en été, ces apports sont encore présents et doivent être combattus ;
- ▶ les charges internes augmentent à cause de l'utilisation d'équipements électroménagers, de bureautique (ordinateurs, imprimantes, vidéoprojecteurs, etc.), de communication (TV, etc.) ;
- ▶ des isolations et étanchéités améliorées confinent ces charges internes dans les locaux ;
- ▶ des étés plus chauds à cause du dérèglement climatique contribuent à intensifier les besoins de climatisation en période caniculaire, tendance qui devrait se renforcer.

Tableau 1.1 Paradoxe des bâtiments énergétiquement très performants et qui ont des problèmes de confort thermique en été (source : Tecsol).

	Charge	Corrélation apports solaires
Charge thermique corrélée avec les conditions météo	Apports par rayonnement à travers les surfaces transparentes	Éventuellement décalage dans le temps lié à l'orientation principale des surfaces vitrées
	Conduction à travers l'enveloppe	Décalage lié à l'inertie thermique du bâtiment
	Réduction d'enthalpie (réduction de température et/ou d'humidité de l'air neuf)	Corrélation principalement au niveau saisonnier
Charges internes	Personnes, équipements, machines	Dépend du type de bâtiment et de son utilisation. Exemples : – Bureaux : utilisés principalement en journée – Hôtels : charges importantes en soirée

1.2.1 Exemple de bâtiment à très basse consommation énergétique au Danemark

La figure 1.2 montre le calcul des charges thermiques pour un bâtiment quasi à énergie zéro (nZEB¹) au Danemark. On voit nettement que, même au Danemark, les charges frigorifiques excèdent les charges thermiques de chauffage.

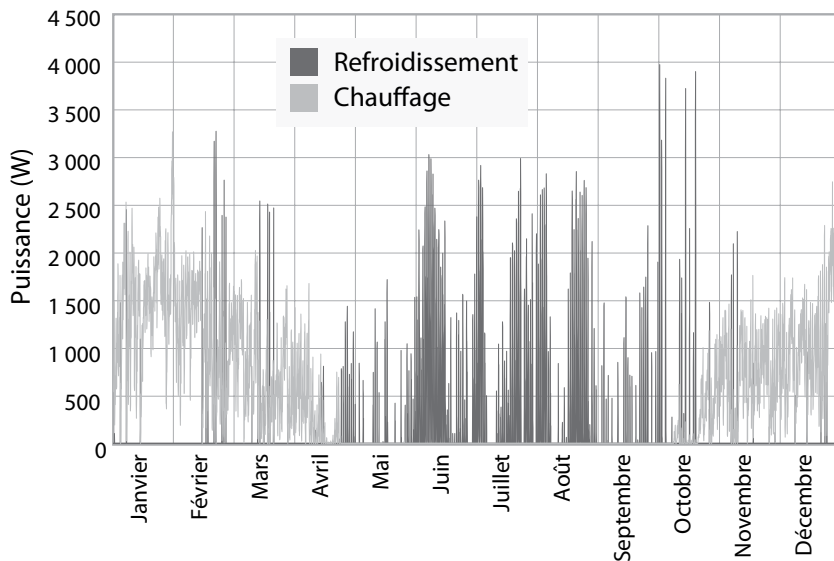


Figure 1.2 Besoins de chauffage et de climatisation dans une maison à très basse consommation au Danemark (source : RHEVA Journal, mai 2011).

À Marseille, un immeuble de bureaux et commerces de type BBC, requiert deux fois plus d'énergie pour le froid de la climatisation que pour le chauffage. Par ailleurs, un tel bâtiment présente des problèmes de confort d'été car les surchauffes, en l'absence de climatisation, peuvent devenir rapidement insupportables dépassant largement les 35 °C malgré la ventilation, peu efficace aux heures les plus chaudes.

1.2.2 La tour Elithis à Dijon

Un autre exemple est la tour Elithis, un bâtiment de type nZEB, constitué essentiellement de bureaux à Dijon (figure 1.3).

1 nZEB : nearly Zero Energy Building.