

Le réseau de froid urbain au cœur des enjeux énergétiques de la ville durable

Christophe Ladaurade est en charge du développement commercial et du marketing au sein de Climespace¹, une filiale d'Engie.

1 Le froid et les enjeux énergétiques et environnementaux de la ville

1.1. Une climatisation en pleine expansion

À l'échelle européenne comme à l'échelle mondiale, les villes rivalisent et cherchent à faire valoir leurs attractivités économiques. Paris est en concurrence avec Berlin ou Londres et se comparera bientôt à New York, Los Angeles ou autres. Sur ce fond de concurrence accrue entre les métropoles européennes et mondiales se pose la question de la meilleure façon d'aborder le sujet de la climatisation.

Qu'est-ce qui fait l'attractivité d'une ville aujourd'hui ? C'est son attractivité économique et

cela passe donc forcément par une activité tertiaire (bureau, commerce et musée) en grand besoin d'être modernisée.

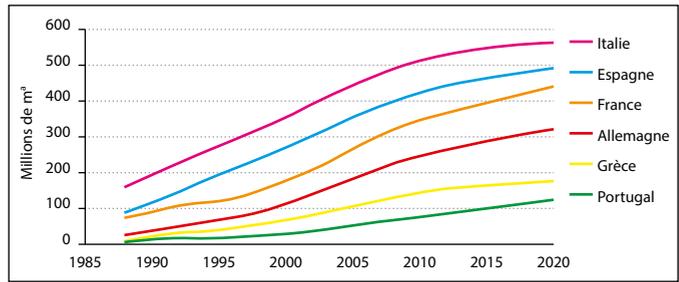
Le graphique de la **Figure 1** met en évidence le fait que la surface climatisée en Europe, en comptant bien entendu le secteur tertiaire, est en forte croissance. Aujourd'hui, environ 50 % de la population mondiale vit en ville, et à l'horizon 2050, ce sera près de 75 %. Les villes sont donc un enjeu majeur du développement durable. Elles mutent, évoluent et commandent des choix politiques d'organisation, d'urbanisation. Lorsqu'on veut étendre une ville, il y a deux solutions : on l'étend vers le haut, et c'est la densification, ou de façon horizontale, et c'est l'extension urbaine. Se pose rapidement la densité des quartiers, le périmètre concerné par la

1. www.climespace.fr

Figure 1

Évolution de la surface climatisée en Europe à l'horizon 2020.

Source : étude Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners pour la Commission Européenne, 2002.



ville, etc., et ces choix ont un coût direct sur les infrastructures à mettre en œuvre.

Parmi les infrastructures concernées, on cite classiquement le réseau d'électricité, le réseau de chaleur, le réseau de télécoms, le réseau d'assainissement, le réseau d'évacuation d'eau usée, et on qualifie les conceptions actuelles de « smart grid² ». En fait, il y a un petit dernier à considérer, c'est le réseau de froid.

1.2. Le réchauffement des villes : les îlots de chaleur

Le système de froid est essentiel pour un aménagement urbain durable, comme nous allons le concrétiser en examinant la ville de Paris, avec le périphérique et la Seine qui traversent la ville. Sur la **Figure 2**, on note l'effet « îlot de chaleur urbain³ » : entre la banlieue et Paris centre, il y a toujours quelques degrés d'écart – il fait toujours plus

chaud en ville, en été comme en hiver. La zone rouge de la **Figure 2** correspond à la rente foncière et tertiaire de la ville de Paris. Ce sont les 1^{er}, 2^e, 8^e et 9^e arrondissements où l'on a des immeubles de type haussmannien avec essentiellement de la surface de bureaux.

L'effet d'îlot de chaleur urbain est dû aux activités humaines au sein de la ville (secteur tertiaire), qui sont génératrices de chaleur et d'urbanisation. Plus une ville est dense et donc haute, plus on a le phénomène de couloir d'air chaud dans les rues qui contribue à l'augmentation de la température. Pour Paris et pour de plus en plus de métropoles, il y a la volonté de vouloir se préparer au réchauffement climatique, et cela conduit à s'interroger sur la trajectoire énergétique à donner à la ville, donc quels sont les schémas directeurs énergétiques dans la ville – le chaud, le froid, l'électricité –, et quelle est la meilleure réponse au besoin de froid ?

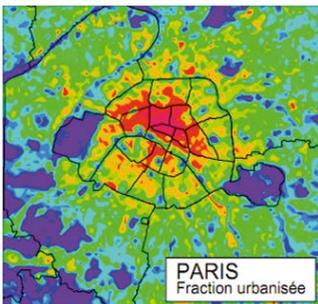


Figure 2

Carte des températures moyennes à Paris, illustrant l'effet d'îlot de chaleur en région parisienne.

Source : APUR et CSTB.

2. Smart grid : réseau dit « intelligent » utilisant les technologies informatiques afin d'optimiser la production, la distribution et la consommation d'énergie pour une meilleure efficacité énergétique.

3. Îlot de chaleur urbain : élévation localisée de température en milieu urbain par rapport aux zones rurales voisines.

2 Principe du réseau de froid

Le rapport au froid, à la climatisation, a évolué comme l'exemple de la climatisation des voitures le montre : il y a trente ans, la climatisation était

une option ; aujourd'hui, c'est un équipement de série dont on n'accepterait plus de se passer. Pour répondre à la demande de froid, il faut mettre en œuvre des technologies innovantes et si possible utiliser les ressources naturelles. Le réseau de froid est une réponse pertinente à cet objectif.

2.1. Comment produire, stocker et distribuer le froid ?

Un réseau de froid remplace les équipements de climatisation autonomes – ceux que l'on trouve en toiture par exemple – par un réseau de distribution d'eau glacée souterrain basé sur des sites de production (**Figure 3**). On utilise des machines frigorifiques⁴ de plusieurs dizaines de mégawatts : des réfrigérateurs géants (nos plus grosses centrales représentent 52 MW de production frigorifique).

On produit de l'eau à 5 °C avec laquelle on alimente les immeubles par un réseau de canalisation souterraine pour faire fonctionner leur système de climatisation et produire l'air frais. Après utilisation par les clients, cette eau est restituée la plus chaude possible, de façon à utiliser un maximum de froid sur le mètre cube d'eau utilisé.

Ce système nécessite des centrales de production, un réseau de distribution, des postes de livraison dans chacun des bâtiments. Tout cela est supervisé par un réseau intelligent. L'ensemble des

bâtiments servis est connecté au poste de contrôle et aux équipements de stockage d'énergie frigorifique sous forme de chaleur latente⁵ ou de chaleur sensible⁶.

Où est la chimie dans la conception et le fonctionnement des réseaux de froid ? Elle est en fait un peu partout. Elle est dans le réseau de distribution parce qu'il faut maintenir les caractéristiques physico-chimiques de l'eau et donc la qualité des canalisations. Elle est dans les centrales de production puisque les groupes frigorifiques utilisent des fluides frigorigènes⁷, des gaz hydrofluorocarbones (HFC), qui sont issus de l'industrie chimique. Elle se trouve aussi dans les équipements d'évacuation des calories, les tours aéroréfrigérantes⁸, qui utilisent des biocides⁹ pour réduire le risque de développement de légionellose¹⁰.

À l'aide du schéma de la **Figure 3**, on comprend que le réseau de froid a un impact sur la réduction de l'îlot de

5. Chaleur latente : chaleur issue d'un changement d'état.

6. Chaleur sensible : chaleur issue d'un changement de température.

7. Fluide frigorigène : fluide permettant le fonctionnement des cycles frigorifiques en permettant des échanges d'énergie.

8. Tour aéroréfrigérante : échangeur de chaleur permettant le refroidissement de l'eau *via* un contact direct avec l'air ambiante.

9. Biocide : substance chimique telle que pesticide et/ou antimicrobien.

10. Légionellose : maladie infectieuse d'origine bactérienne dont la bactérie peut se développer dans les tours aéroréfrigérantes ou dans les climatiseurs.

4. Machine frigorifique : machine diatherme ayant pour fonction de refroidir un environnement grâce à des échanges thermiques.

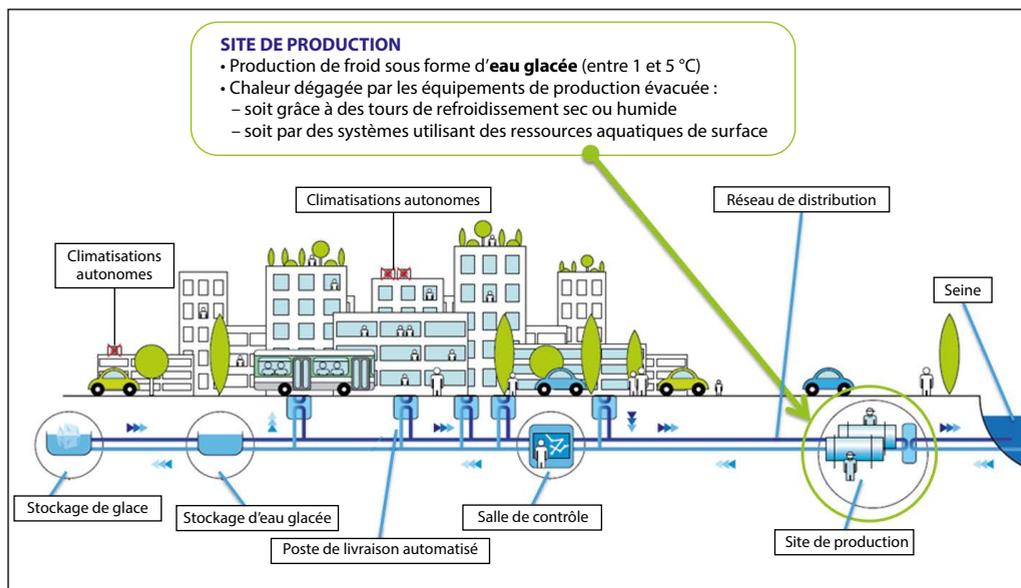


Figure 3

Principe du réseau de froid avec ses unités clés pour assurer la climatisation d'une ville.

chaleur urbain. La climatisation classique met sur les toits des groupes calorifiques à la place d'une végétalisation ; les calories extraites du bâtiment sont donc rejetées dans l'atmosphère, et ce rejet-là plus la chaleur stockée dans les bâtiments puis rayonnée à l'extérieur contribue à l'îlot de chaleur urbain.

Le réseau de froid permet d'évacuer les calories par les sous-sols. Dans les simulations réalisées, on estime la réduction correspondante de température de la rue à au moins un degré. Trois de nos équipements sont raccordés à la Seine qui constitue le fluide dans lequel les calories sont rejetées dans le respect de la loi sur l'eau qui impose que cette opération soit neutre sur la faune et la flore existantes.

2.2. Le réseau urbain de distribution d'eau glacée

À côté de la mission d'assurer l'efficacité énergétique, vient celle d'équiper l'espace urbain. Il s'agit de poser des tuyaux en sous-sols. 60 % quasiment du réseau est aujourd'hui en égout, car la ville de Paris bénéficie d'un réseau d'égouts très développé (Figure 4A), et 30 % sont enterrés (Figure 4B). Un idéal serait d'avoir des galeries techniques, mais on ne trouve cela que dans les quartiers qui ont fait l'objet de ré-urbanisation récente (Figure 4C).

À la différence du réseau d'eau potable, le réseau de froid nécessite deux tuyaux, l'aller et le retour : c'est « double peine » ! Pour desservir des artères comme les Champs-Élysées (Figure 4B), ce sont

deux tuyaux de 70 centimètres de diamètre qu'il faut poser, soit des tranchées de plus de deux mètres, problématiques pour les rues parisiennes.

La **Figure 5** représente le poste de livraison qui complète le

réseau de froid. C'est la sous-station, installée dans chaque bâtiment, et qui en est le point d'entrée. Ses quinze mètres carrés se substituent aux installations de rafraîchissement et de climatisation et libèrent



Figure 4

Installations souterraines pour le réseau de froid d'une ville, exemple de Paris.

- A) Utilisation des égouts pour l'installation du réseau de froid ;
- B) l'installation est enterrée dans 30 % des cas ;
- C) utilisation de galeries techniques pour les quartiers récents ou rénovés.

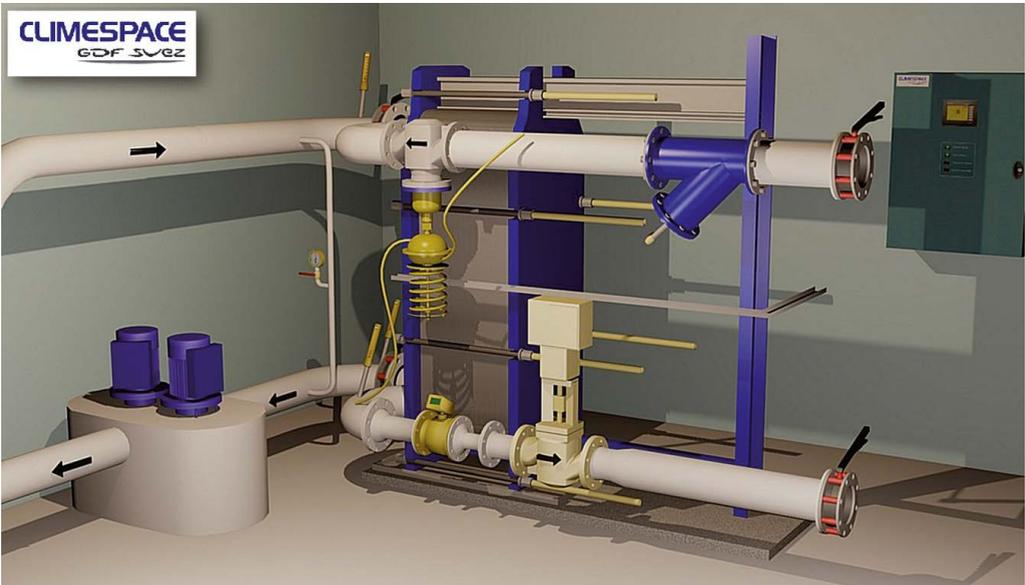


Figure 5

Poste de livraison d'eau froide pour l'alimentation en froid d'un bâtiment.

la toiture pour la végétalisation ou l'agriculture urbaine.

Le poste de livraison est constitué d'un échangeur à plaques¹¹ muni de deux vannes, l'une pour contrôler la pression du réseau et l'autre le débit, en fonction de l'énergie appelée dans l'immeuble. L'hiver, la vanne sera fermée ou très peu ouverte, l'été, elle sera grande ouverte.

Comme pour l'électricité, le client dispose d'un abonnement et paye à hauteur de ce qu'il consomme. Il rentre vraiment dans une logique d'économie et peut maîtriser sa consommation énergétique au regard de ses besoins en froid alors qu'en l'absence d'un réseau de froid, la climatisation est noyée dans la consommation d'électricité globale de l'immeuble.

3 Climespace, acteur central du réseau de froid

Climespace, qui œuvre dans le cadre d'une délégation de service public, est né en 1991. Son histoire commence avec l'excédent de capacité de la centrale de refroidissement et de rafraîchissement des chambres froides des Halles et avec la décision d'en exporter la capacité à un bâtiment voisin. Un peu plus tard, le musée du Louvre a fait part d'un besoin de froid important, ce qui a entraîné la décision de créer un réseau de froid à l'échelle de la ville de Paris (Figure 6).

11. Échangeur à plaques : échangeur de chaleur se présentant sous la forme d'un mille feuilles de plaques où le fluide caloporteur circule entre chaque plaque.

3.1. Climespace en quelques chiffres

À la fin 2015, Climespace, représente un effectif de plus de 134 collaborateurs, 600 bâtiments raccordés, 470 gigawattheures par an d'énergie frigorifique distribuée (Encart : « *Climespace, concessionnaire de la Ville de Paris depuis 1991* »). Climespace est le deuxième consommateur d'électricité dans Paris intramuros après la RATP avec 400 mégawatts de puissance raccordée.

Le réseau urbain de froid fait 73 kilomètres et participe à la spectaculaire vie souterraine de Paris, particulièrement encombrée dans les quartiers haussmanniens à forte densité, avec le métro, les télécoms, le gaz, la chaleur.



Figure 6

Depuis 1991, le réseau de froid parisien n'a cessé de se développer grâce à la création de Climespace.

CLIMESPACE, CONCESSIONNAIRE DE LA VILLE DE PARIS DEPUIS 1991 (Figure 7)

- 134 collaborateurs ;
- plus de 600 clients ;
- 77 M€ de chiffre d'affaires ;
- 470 GWh/an d'énergie frigorifique distribuée ;
- 401 MW de puissance froid raccordée (31/12/2015) ;
- 10 sites de production et 3 sites de stockage ;
- 73 km de réseau urbain ;
- 25 M€ d'investissements/an (centrales/réseau/sous-stations) ;
- 30 nouveaux clients/an en moyenne ;
- 5 millions de m² climatisés à partir du réseau ;
- 60 000 tonnes d'émission de gaz carbonique évitées par an.



Figure 7

Climespace, l'entreprise qui gère le réseau de froid de Paris, est certifiée en Qualité, Environnement et Sécurité (Certification Bureau Veritas).

L'encombrement est parfois tel que certains immeubles ne peuvent pas être raccordés.

Le réseau consacre environ 25 millions d'euros par an à l'investissement ; il est rejoint par une trentaine de nouveaux clients par an et concerne cinq millions de mètres carrés climatisés dans Paris intra-muros.

3.2. L'étude d'un cas : le réseau de froid parisien

La **Figure 8** représente les trois réseaux de froid actuellement installés dans Paris intra-muros. Le plus gros réseau, le réseau centre, concerne les 1^{er}, 2^e, 8^e et 9^e arrondissements. Il est constitué d'immeubles haussmanniens installés en bureaux, et correspond à l'îlot de chaleur parisien le plus important (voir la **Figure 2**). Deux

centrales refroidies par les eaux de la Seine l'alimentent ; elles constituent la base de la production et permettent d'éviter les tours aéroréfrigérantes, chimiquement plus polluantes.

Le quartier de la Bibliothèque Nationale de France (BNF) fait actuellement l'objet d'une ré-urbanisation avec un aménagement (la SEMAPA). L'aménagement a commencé à proximité de la gare d'Austerlitz et se termine aujourd'hui avec les travaux conduits à proximité de la zone d'Ivry sur Seine. Les affectations des parcelles sont diverses : activités tertiaires ou résidentielles. La création d'un réseau de froid Sud-Est accompagne rigoureusement cet aménagement.

Le dernier-né, le réseau de froid Nord-Est, dans le quar-



Figure 8

Carte de l'ensemble du réseau de froid de parisien.

tier de la porte d'Aubervilliers, a une conception particulière. Il est mixte avec le réseau de chaleur et comprend des thermo-frigo-pompes¹², qui produisent à la fois du froid – valorisé sur le réseau de froid – et de la chaleur – valorisée sur le réseau de chaleur. Il bénéficie d'un puits de géothermie qui permet d'aller puiser les calories complémentaires pendant l'hiver lorsqu'il n'y en a pas assez et d'aller injecter le surplus de calories en été lorsque les besoins de froid sont importants.

12. Thermo-frigo-pompe : pompe à chaleur permettant de chauffer en hiver et de refroidir en été.

3.3. Une expertise complète proposée par Climespace

Climespace et Engie ont la capacité, ensemble, d'accompagner les villes dans la conception de leurs infrastructures énergétiques, de la spécification d'un schéma énergétique jusqu'à la construction et l'exploitation (Figure 9). Traiter ainsi ensemble toute la chaîne valeur énergétique est la meilleure façon d'assurer l'efficacité énergétique et environnementale.

3.4. Des clients variés et nombreux

Les utilisateurs des réseaux de froid de Climespace

couvrent pratiquement toutes les activités tertiaires (Figure 10). 70 % des clients sont des parcs de bureaux ; ils correspondent à quatre millions de mètres carré de bureau, soit environ 17 % des bureaux parisiens. Les centres commerciaux sont aussi des clients importants, comme Beaugrenelle, le Carrousel, le Forum des Halles, qui est un client historique, les Galeries Lafayette, comme aussi les magasins de la Samaritaine

qui doivent ouvrir prochainement. D'autres usagers sont des salles de spectacle, des musées comme le musée du Louvre (son client le plus ancien), de l'hôtellerie et des bâtiments officiels et institutionnels comme l'Assemblée Nationale.

Depuis 1991, la puissance cumulée du réseau n'a cessé d'évoluer, et sa consommation énergétique d'augmenter (Figure 11). On observe une légère érosion des consom-

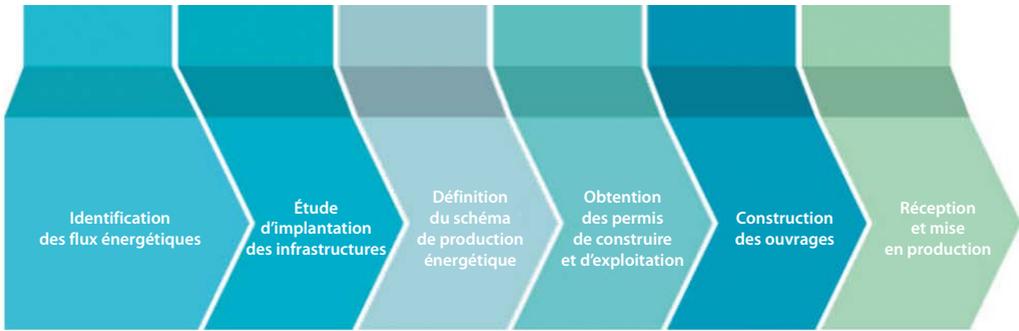


Figure 9

Compétences de Climespace pour la mise en place d'un réseau de froid. Climespace assure le rôle de maîtrise d'ouvrage dans le dimensionnement, la conception, l'intégration urbaine et paysagère de ses centrales de production.

<p>BUREAUX</p> <ul style="list-style-type: none"> Allianz AXA BNP Paribas Constructa Crédit Lyonnais Gecina Generali Groupama Naxistis Scor SFL 	<p>CENTRES COMMERCIAUX</p> <ul style="list-style-type: none"> Beaugrenelle Carrousel du Louvre Forum des Halles Galeries Lafayette <p>MUSÉES, SALLES DE SPECTACLE</p> <ul style="list-style-type: none"> Le Louvre Musée du quai Branly Musée Grévin Cité de la Musique Salle Pleyel La Philharmonie 	<p>PALACES</p> <ul style="list-style-type: none"> Le Bristol Le Four Seasons Georges V Le Péninsula Le Meurice Le Plaza Athénée <p>BÂTIMENTS OFFICIELS</p> <ul style="list-style-type: none"> Assemblée Nationale Ministère de la Défense Ministère de l'Écologie Hôtel de Ville de Paris 	
---	--	---	--

Figure 10

De nombreux clients de type bureau mais aussi d'autres secteurs pour Climespace.

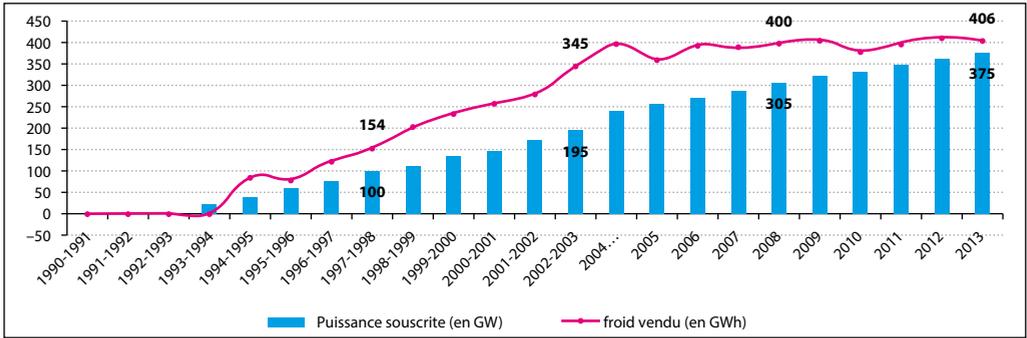


Figure 11

Évolution de la puissance produite et du froid vendu par Climespace entre 1990 et 2013 : on observe un développement continu du réseau depuis sa création

mations depuis les années 2000. C'est l'effet des réglementations thermiques : les objectifs assignés font que la consommation énergétique des bâtiments baisse également en froid.

Climespace a plus de 600 clients (Figure 12). Qu'est ce qui les motive ?

- La durée de vie de l'équipement en froid est aussi longue que celle du bâtiment.
- La facilité de faire évoluer la puissance de l'installation : ce n'est qu'une question de clauses contractuelles avec

l'exploitant du réseau de froid.

- La fiabilité de l'exploitation est incomparable. Le réseau est conçu pour être robuste, avec sa conception maillée qui permet de suppléer à une avarie accidentelle.
- Les certifications environnementales (telle que HQE) que recherchent de plus en plus de propriétaires sont plus faciles à obtenir, car le réseau de froid lui-même est vertueux. L'efficacité énergétique et environnementale en est en effet excellente (Figure 13 et 14).

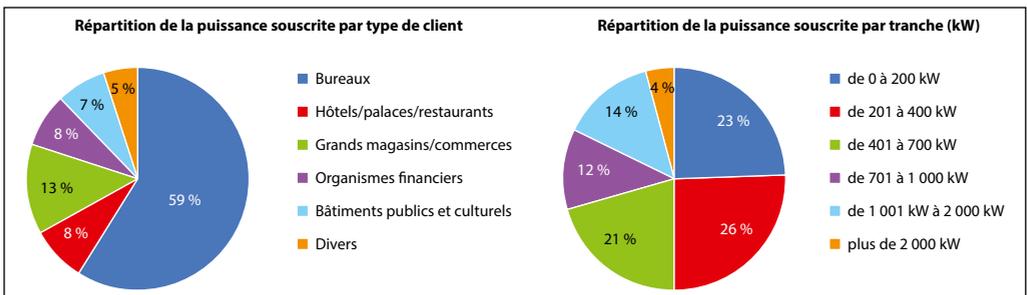


Figure 12

Organigramme de la clientèle de Climespace. Des clients variés pour une demande en froid variée. En 2016, plus de 600 clients font confiance à Climespace, qui propose un accompagnement et des conseils adaptés à chaque typologie de client.

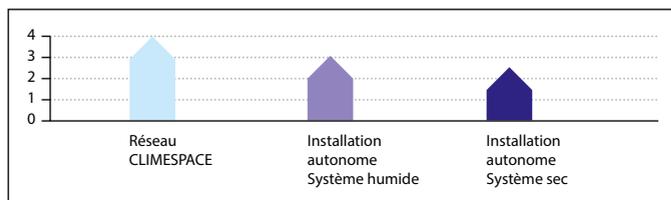


Figure 13

Comparaison des systèmes de production de froid pour la climatisation. Le réseau Climespace est un système plus performant.

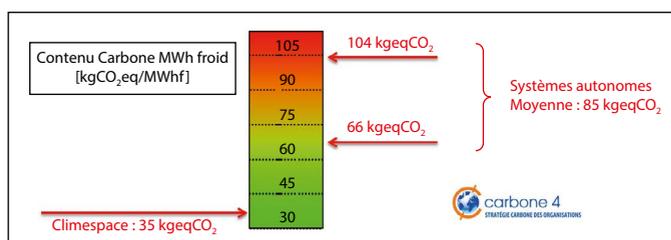


Figure 14

Des émissions carbone affaiblies grâce à Climespace.

De plus, depuis 2013, Climespace garantit de ne faire usage que d'énergies renouvelables (Figure 15).



Figure 15

Depuis 2013, Climespace a fait le choix d'approvisionner à 100 % de ses sites de production en électricité garantie d'origine renouvelable.

4 Le réseau de froid pour lutter contre les émissions de CO₂.

Près de 25 millions de tonnes d'équivalent CO₂ sont émises chaque année par la ville de Paris, qui se décompose en quatre grandes masses émettant à peu près à valeurs égales : transport de personnes, consommation et déchets, bâtiments, transport de marchandises (Figure 16).

La climatisation sur le secteur tertiaire représente 11 % des émissions (Figure 17). Le remplacement des installations autonomes de climatisation par les réseaux de froid contribue aujourd'hui pour environ 2 % à la réduction des émissions des gaz à effet de serre de la ville de Paris.

Figure 16

État du bilan carbone de Paris en 2009. Sur le seul secteur du bâtiment parisien, la consommation énergétique de 30 677 GWh représente l'émission de 5 760 000 tonnes équivalent carbone.

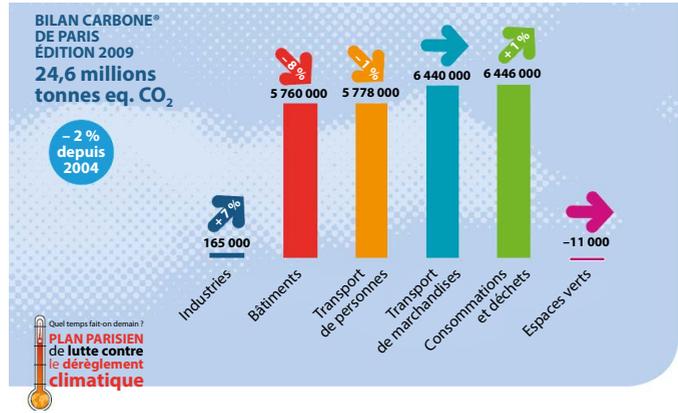
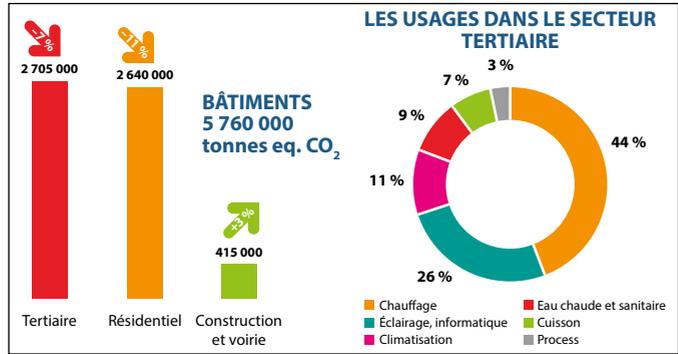


Figure 17

La climatisation dans le secteur tertiaire : une source importante d'émission. Le secteur tertiaire pèse pour près de la moitié des émissions du bâtiment dans Paris. La consommation énergétique des bâtiments tertiaires est principalement générée par les besoins de chauffage et de climatisation, suivis par ceux de l'éclairage et l'informatique.



La climatisation est à prendre au sérieux

Les besoins ont changé. Le temps de présence en bureau des adultes au travail n'a plus rien à voir avec celui des générations antérieures. La distribution des produits de consommation se fait selon des méthodes également toutes différentes, avec des centres commerciaux qui ne ressemblent plus aux petits commerces d'autrefois. Les besoins en confort des habitants des villes sont aussi nouveaux.

Tous ces changements qui marquent notre « civilisation » imposent la climatisation comme

un équipement obligatoire. À l'instar de ce qui se fait pour l'électricité, l'eau ou les télécoms, il faut distribuer le froid aux logements et aux bureaux globalement à l'échelle des quartiers urbains et donc par l'installation et l'exploitation de réseaux.

L'exemple des réseaux de froid de Climespace pour la ville de Paris montre que c'est possible, que le savoir-faire existe, que les usagers le comprennent et le mettent en pratique. L'équipement en climatisation illustre ainsi les avantages énergétiques et environnementaux d'actions collectives et techniquement innovantes.

