



Agence Régionale de l'Énergie Provence Alpes Côte d'Azur

2, rue Henri Barbusse
13241 Marseille Cedex 1

Tél : 04.91.91.53.00 - Fax : 04.91.91.94.36

Etude des paramètres influant sur les consommations de climatisation dans les immeubles de bureaux

Rapport final

Mars 2002

Etude financée par le contrat de plan Etat-Région



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
Délégation Régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur



E N E R T E C H

Ingénierie énergétique et fluides

F - 26160 FELINES S/RIMANDOULE

tél. & Fax : (33) 04.75.90.18.54

E mail : sidler@club-internet.fr

<http://perso.club-internet.fr/sidler>

SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
1. GENERALITES SUR LES SYSTEMES DE CLIMATISATION	7
2. DESCRIPTION DES BATIMENTS	9
2.1 AVIGNON	9
2.2 MARSEILLE 1	12
2.3 MARSEILLE 2	15
2.4 TOULON 1	17
2.5 TOULON 2	20
2.6 MOUANS-SARTOUX	22
3. DESCRIPTION DES APPAREILS DE MESURES UTILISES	26
3.1 MATERIEL DE MESURE :	26
3.2 LISTE DES POINTS DE MESURE MIS EN PLACE A AVIGNON	28
3.3 LISTE DES POINTS DE MESURE MIS EN PLACE A MARSEILLE 1	29
3.4 LISTE DES POINTS DE MESURE MIS EN PLACE A MARSEILLE 2	30
3.5 LISTE DES POINTS DE MESURE MIS EN PLACE A TOULON 1	31
3.6 LISTE DES POINTS DE MESURE MIS EN PLACE A TOULON 2	32
3.7 LISTE DES POINTS DE MESURE MIS EN PLACE A MOUANS SARTOUX	33
4. CONSOMMATIONS ET NIVEAUX DE CONFORT ATTEINT.	34
4.1 COMPARAISONS DES CONSOMMATIONS DES DIFFERENTS BATIMENTS	34
4.2 REPARTITION DE LA CONSOMMATION DE CLIMATISATION	34
4.3 CORRELATION DE LA CONSOMMATION AU SERVICE RENDU	36
5. POIDS DE LA CLIMATISATION DANS LA FACTURE D'ELECTRICITE	46
5.1 BATIMENT AVIGNON	46

5.2 BATIMENT MARSEILLE 1	48
5.3 BATIMENT TOULON 1	48
5.4 BATIMENT TOULON 2	49
5.5 CONCLUSION	49
6. MODES D'UTILISATION DE LA CLIMATISATION	50
6.1 SYSTEMES A DETENTE DIRECTE INDEPENDANTS PAR BUREAUX (SPLITS ET MULTISPLITS) - AVIGNON ET MARSEILLE 2	50
6.2 GROUPE FROID CENTRALISES ET VENTILO-CONVECTEURS A DETENTE DIRECTE.- MARSEILLE 1	51
6.3 GROUPE FROID CENTRALISE ET DISTRIBUTION D'EAU GLACEE	51
7. ANALYSE DES CHARGES DE CLIMATISATION	58
7.1 METHODE EMPLOYEE	58
7.2 RESULTATS	60
8. PROPOSITIONS D'AMELIORATION DES PERFORMANCES ENERGETIQUES	74
8.1 APPORTS INTERNES	74
8.2 RENOUELEMENT D'AIR	77
8.3 ISOLATION DE TOITURE	79
8.4 AMELIORATION DES SYSTEMES DE CLIMATISATION	79
8.5 CONTROLE DES APPORTS PAR LES VITRAGES	82
8.6 INERTIE DES LOCAUX	83
CONCLUSION	85

INTRODUCTION

La climatisation est aujourd'hui au centre de vastes débats souvent très animés, dans lesquels s'opposent ceux qui pensent que ne pas l'avoir c'est le retour à la bougie, et ceux qui pensent que l'avoir est inutile sous nos latitudes. Qui a raison ? Probablement les deux partis, mais malheureusement ils ne discutent pas, comme souvent, sur des bases identiques.

Pour les premiers, le confort actuel de certains bâtiments est intolérable en été, ce qui est incontestable, et donc il faut les climatiser. Qui peut aller contre une si belle logique ?

Pour les seconds, les conditions de confort actuelles sont mauvaises, mais si l'on se penche sur leur origine, on doit arriver à recréer des conditions de confort permettant de se passer de la climatisation. Cela reste à prouver.

Le débat est donc largement ouvert. Et l'objet de cette étude est de l'alimenter de la façon la plus objective possible.

En premier lieu l'observateur ordinaire constate que les habitudes de la construction ont beaucoup évolué depuis quelques décennies. La nature et la masse des matériaux utilisés, les procédés de construction, l'architecture elle-même ont changé. Il est incontestable que les bâtiments d'aujourd'hui se sont affranchis d'un certain nombre de contraintes comme la nécessité jadis de réduire les surfaces de vitrage afin de pouvoir chauffer en hiver, ou bien celle de bâtir des murs épais parce qu'on ne disposait pas des moyens de construire autrement et de façon solide. Cette liberté dans les formes, dans les surfaces et dans le choix des matériaux crée un renouveau de l'architecture, mais il est incontestable que cette liberté nouvelle n'a pas été gérée avec toute la prudence qu'une bonne prise en compte des phénomènes énergétiques induits aurait nécessité. La tâche, il est vrai, n'était pas très simple. A force d'erreurs, l'homme avait fini au cours des siècles, par comprendre ce qu'il fallait éviter et les influences qu'il fallait rechercher. Au XX^e siècle on est pressé, et on n'a pas le temps d'attendre deux siècles pour comprendre nos erreurs. Mais dans ce cas, il faudrait utiliser des méthodes d'évaluation qui n'ont, à ce jour, pas encore été mises en œuvre. L'architecture méditerranéenne contemporaine se trouve donc aujourd'hui dans une situation un peu paradoxale : elle s'est profondément transformée, mais ces transformations se sont opérées en dehors de toute prise en compte sérieuse des évolutions du comportement thermique probable des nouveaux bâtiments. C'est la première observation.

Si l'enveloppe a profondément changé, son contenu a aussi beaucoup évolué. A l'intérieur des bâtiments on trouve aujourd'hui de nombreux équipements et aussi de nombreux occupants. Il est difficile de dire si la densité de population dans les locaux a augmenté, en revanche il est certain que la quantité d'équipement de bureautique a explosé depuis dix ans, tout comme les besoins en lumière artificielle. Tous ces matériels rendent service aux occupants, mais ils consomment de l'électricité, et cette électricité finit en quasi-totalité en chaleur à l'intérieur des locaux. Ainsi la transformation des activités et des moyens de travail à l'intérieur des locaux constituent le second grand changement des dernières années. Et les conséquences de ces changements sont importantes en terme de confort, comme il sera évoqué au cours de cette étude.

Enfin, les exigences des occupants ont changé. La notion de confort a beaucoup évolué depuis cinquante ans. Elle est hautement subjective, de nombreux auteurs l'ont déjà démontré, et elle est aussi extrêmement personnelle. De là à penser qu'elle est fortement sous influence de la publicité, il n'y a qu'un pas que l'on serait tenté de franchir. On ne peut en effet nier que, à l'image de tous les besoins qu'expriment les gens aujourd'hui, l'envie d'un certain confort soit abondamment façonnée par les incessants messages publicitaires que reçoit le public. En clair, on peut admettre aujourd'hui que le besoin de confort, et plus particulièrement celui de climatisation, se crée comme se sont créés par l'intermédiaire de la publicité et des modes tant d'autres besoins « de consommation » dans un passé récent.

Parmi les exigences qui ont évolué figure aussi l'augmentation de la rentabilité des personnels travaillant dans des espaces climatisés. Cette exigence est souvent celle qui motive l'installation de la climatisation dans les locaux. Elle correspond aussi à une évolution des mentalités, et au même titre que toutes les autres, elle doit être considérée.

Tout ceci serait sans incidence, voire sans intérêt, si le développement rapide et massif de la climatisation ne posait quelques problèmes délicats, surtout dans l'approche actuelle du « développement durable ». Ces problèmes sont cruciaux dans les pays du bassin méditerranéen comme la Tunisie, l'Algérie ou le Maroc, mais ils sont aussi importants dans le sud de la France. L'attention est effectivement attirée par :

- les problèmes d'approvisionnement en électricité que pose la climatisation. Il s'agit à la fois des volumes produits, mais peut être surtout des problèmes que posent les pointes estivales qui se développent de plus en plus en prenant l'ascendant sur les pointes hivernales. La question des pointes renvoie à la fois vers des problèmes de production mais aussi de dimensionnement de réseau,

- la production d'électricité est source importante de nuisances environnementales. Qu'elle soit produite par voie thermique classique (gaz, fioul, charbon) et génère de l'effet de serre, ou par voie nucléaire en produisant des déchets radioactifs dont personne ne sait ce dont on en fera demain, l'électricité est une des principales sources de nuisances environnementales aujourd'hui. Qui plus est, le courant produit en heure de pointe est à la fois un des plus polluants pour l'air (recours à des centrales thermiques classiques) et des plus chers.

Mais au titre des nuisances environnementales, la climatisation présente une caractéristique supplémentaire : beaucoup de systèmes utilisent aujourd'hui la « détente directe ». Il s'agit d'une technologie intéressante parce qu'elle améliore l'efficacité des cycles de production de froid, mais elle possède un gros défaut, celui de multiplier les volumes de fluide frigorigène en circulation. Au lieu d'être cantonné à l'appareil de production de froid, le fluide frigorigène est véhiculé jusqu'aux émetteurs (ventilo-convecteurs) dans lesquels il se détend. Cet important réseau de fluide frigorigène est soumis, comme tous les réseaux, à des risques de fuite. Or, malgré les efforts consentis depuis plusieurs années pour mettre en oeuvre de nouveaux fluides, il reste en service d'importantes quantités de fluide contenant des CFC et dont le rôle dans la destruction de la couche d'ozone est patent.

- la climatisation c'est aussi une augmentation des coûts d'exploitation. Certes cette augmentation est souvent minime du fait de la tarification estivale, mais elle ne peut être ignorée.

Préoccupée depuis plusieurs années des impacts énergétiques et environnementaux de la climatisation, l'ARENE PACA avait placé des compteurs électriques sur les systèmes de production de froid d'une vingtaine de bâtiments climatisés afin d'étudier les consommations afférentes. Devant les disparités importantes des consommations observées, l'ARENE a souhaité que les causes de ces consommations soient recherchées.

L'objectif de cette étude est donc, sur un échantillon beaucoup plus réduit (6 bâtiments seulement), mais avec une métrologie beaucoup plus lourde, de vérifier les conditions de confort obtenues, de tenter d'expliquer les causes et les différences observées dans la consommation des groupes de production de froid des différents bâtiments afin de proposer des axes d'intervention et d'amélioration.

1. GENERALITES SUR LES SYSTEMES DE CLIMATISATION

Depuis plusieurs années, l'analyse des consommations de climatisation d'une vingtaine d'ensembles de bureaux dans la région PACA ont permis à l'ARENE de mesurer la part importante de ces dépenses dans la facture énergétique des bâtiments.

La recherche d'améliorations se heurte toutefois à la connaissance des paramètres les plus influents sur ces consommations. En particulier, l'influence du bâti, des systèmes mis en œuvre et surtout du comportement des utilisateurs reste très méconnu. C'est pourquoi une campagne de mesures détaillée a été entreprise sur six bâtiments. Les consommations électriques de climatisation, températures, hygrométries et ensoleillement ont été mesurées par site. Un total de plus de cinquante bureaux, halls ou locaux informatiques ont été équipés systématiquement de capteurs de température, d'hygrométrie, de présence, de fonctionnement de climatisation et de consommation d'éclairage. En outre, des détecteurs d'ouverture ont été placés sur certaines portes et fenêtres et des mesures de volumes de condensats ont été effectuées dans cinq bureaux.

Les systèmes de climatisation étudiés utilisent tous un ou plusieurs groupes frigorifiques qui assurent la génération de froid à partir d'électricité selon un cycle de compression. La source froide est constituée par l'air des bureaux. La source chaude est l'air extérieur. Les ventilo-convecteurs entraînent un flux d'air ambiant au travers d'une batterie froide. Cette batterie est soit l'évaporateur du groupe lui-même (détente directe), soit irriguée par de l'eau glacée produite (l'évaporateur étant alors en contact avec un échangeur à eau dans le groupe central). La chaleur est rejetée au niveau du condenseur, situé à l'extérieur et largement ventilé lorsque le compresseur est en fonction.

L'efficacité du cycle de compression des groupes frigorifiques est d'autant meilleure que l'écart de température entre les sources froide et chaude est faible (rendement de Carnot). La variation est très rapide et pour les cycles utilisés en climatisation, pour une production de froid initialement à 6°C et une source chaude à 35°C, l'efficacité varie de 2% par degré d'écart entre les sources chaude et froide (avec un léger avantage à l'abaissement de la température de la source chaude par rapport à l'élévation de la température de la source froide).

- *Systèmes à eau glacée :*

Les systèmes centralisés à eau glacée sont pénalisés par le fait qu'ils doivent échanger le froid produit avec l'eau. Cet échange nécessite un écart de température qui se traduit par une efficacité diminuée par rapport aux systèmes à détente directe. Cependant, ces groupes ont des puissances supérieures aux groupes indépendants à détente directe et bénéficient donc de rendements moteur et système plus élevés.

- *Groupes indépendants à détente directe (split) :*

Un petit compresseur placé à l'extérieur est relié à un (voire deux) évaporateurs placés à l'intérieur. Les raccords conduisent le fluide frigorigène sur les quelques mètres séparant les unités. La régulation de chaque groupe est effectuée indépendamment au moyen d'un thermostat placé dans la pièce climatisée.

- *Groupe centralisé à détente directe (VRV : variable refrigeration volume)*

Un groupe de production de froid alimente un réseau de distribution de fluide frigorigène sous forme liquide. Les ventilo-convecteurs, indépendants, utilisent des batteries qui sont en fait des évaporateurs. Le fluide est retourné au groupe sous forme gazeuse. Cette configuration est la plus performante car elle combine l'avantage de la détente directe à la taille importante du groupe qui autorise des rendements élevés. La régulation se fait au niveau de chaque évaporateur et le groupe réagit à la demande de fluide frigorigène dans le circuit.

En outre, la variation de vitesse des compresseurs (inverter), ou leur fonctionnement en cascade, permet d'améliorer le coefficient de performance lors du fonctionnement à charge partiel qui est très fréquent en climatisation. En contrepartie, le volume de fluide frigorigène est bien plus élevé ainsi que le risque de fuite. C'est pourquoi cette solution n'est guère envisageable pour les grands ensembles.

Tous les systèmes étudiés permettent une régulation par pièce de la température. L'utilisateur détermine la mise en fonction de la climatisation et peut choisir une consigne de température ainsi qu'une vitesse de soufflage d'air. L'interface se fait soit par une télécommande, par un boîtier mural ou encore directement sur le ventilo-convecteur. La régulation agit directement sur le fonctionnement du groupe, sur la quantité de fluide frigorigène admis, ou encore sur l'arrivée d'eau glacée selon les cas. Elle détermine ainsi la température d'air de soufflage de manière à atteindre la température souhaitée dans le local.

L'humidité n'est pas contrôlée. La condensation a lieu sur la batterie froide lorsque la température de la batterie froide est inférieure au point de rosée de l'air ambiant. L'air soufflé est alors presque à saturation. Pour une pièce à 25°C et 50% d'hygrométrie (10 g d'eau par kilogramme d'air sec), une batterie froide à 10°C entraîne la condensation d'environ 2.5 ml d'eau par mètres cube d'air soufflé soit environ 0.75 litres par heure pour un évaporateur classique soufflant 300 m³/h. Si les apports d'humidité sont limités, (théoriquement de 60 g/h/personne et environ 215 g/h pour le renouvellement d'air - 30 m³/h, 28°C, 60%RH), l'hygrométrie de l'air ambiant s'équilibre de façon telle que les apports compensent les condensats évacués par l'évaporateur (soit environ 43% si la température se maintient à 25°C). La déshumidification obtenue est très liée à la température de la batterie froide déterminée par la régulation. Dans la pratique, cette température est d'autant plus basse que l'écart entre consigne et température ambiante est grand. Ainsi, pour accroître le taux de déshumidification, il suffit de programmer une consigne de température très basse. C'est précisément ce que font les occupants souhaitant un confort maximal.

2. DESCRIPTION DES BATIMENTS

2.1 AVIGNON



2.1.1 Bâtiment

Le bâtiment, situé en zone périurbaine, date du début des années 90. Il est placé au milieu de l'emprise du terrain, lui-même bordé par des terrains agricoles (Recherche INRA) ou de petites constructions résidentielles à un étage maximum.

Le bâtiment, à ossature bois, construit sur terre plein, comprend 2 niveaux. Sa forme générale est compacte à l'exception notable d'une salle de réunion séparée et raccordée au corps principal par l'intermédiaire d'un couloir fortement vitré et exposé donnant plein Sud.

Les parois opaques sont revêtues à l'extérieur d'un bardage bois plutôt foncé. Elles sont constituées d'une isolation verticale en laine minérale de 80 mm (selon les plans) dans la structure et d'un revêtement intérieur en plaque de plâtre.

La toiture de forme arrondie est réalisée en bac acier de couleur grise. Sur la plus grande partie du bâtiment un comble non aménagé fait fonction d'espace tampon entre l'extérieur et le niveau R+1. Par contre, à l'extrémité Est du bâtiment, les locaux climatisés sont placés directement sous toiture. L'isolation sous toiture est constituée par 160 mm de laine minérale déroulée en combles ou en sous face de la toiture.

L'inertie du bâtiment, principalement constituée par la dalle sur terre-plein est légère. Le cloisonnement intérieur en bois et verre ainsi que le plancher bois du niveau haut n'ont qu'un impact très faible sur l'inertie générale. Le ratio surface des masses / surface au sol est de 0,5.

Par ailleurs, la salle de réunion, d'un seul niveau sur terre-plein, est située directement sous la toiture.

2.1.2 Orientation - Ensoleillement - Vitrages

L'axe longitudinal du bâtiment principal est orienté Est Ouest. Les masques lointains sont faibles.

La façade Sud de 125 m² est entièrement vitrée mais bénéficie d'une importante protection contre l'insolation constituée, d'une part par une casquette de 1.5 m de débord à 5.5 m de hauteur, et d'autre part par un ensemble d'arbres situé à proximité du bâtiment et dépassant la base de la toiture.

Le pignon Est est peu vitré, contrairement au pignon Ouest (13 m²) cependant protégé par de la végétation. La salle de réunion, quant à elle, est complètement vitrée sur l'Est, sans masque, ainsi que sur le Sud. Sur ces deux orientations le vitrage est surmonté d'une casquette insuffisante.

L'ensemble des menuiseries est en aluminium sans rupture de pont thermique, et reçoit un double vitrage de type 4/6/4. Les vitrages sont équipés de protections solaires intérieures (stores tissus de couleur bleu foncé) sur toutes les orientations ainsi que de stores extérieurs à l'Ouest.

La toiture est complètement ensoleillée et ne comporte pas d'ouverture transparente.

Le ratio surface vitrée / surface au sol est de 44%.

2.1.3 Ventilation

La ventilation des locaux est de type simple flux et réalisée par un groupe d'extraction situé en combles fonctionnant en permanence.

Les entrées d'air sont constituées de modules 30 m³/h placés en menuiserie. L'extraction se fait en pièces humides, dans le couloir du rez de chaussée, ainsi que dans le local bureau d'étude (BE) à R+1.

Les débits de renouvellement d'air n'ont pas été mesurés; les valeurs retenues pour l'étude sont les valeurs annoncées dans les documents de construction : 540 m³/h (dont 120 m³/h dans le BE).

2.1.4 Apports internes

Les apports internes électriques sont générés par les équipements principaux suivants :

- 18 postes informatiques,
- 3 imprimantes lasers dans les bureaux
- 1 ensemble informatique dans le BE (PC, imprimantes, onduleur, etc,...(500 W mesuré),
- équipements informatiques centraux dans le local informatique à R+1,
- 1 photocopieuse à R+1,
- éclairage (puissance installée 7580 W).

L'éclairage électrique intérieur d'une puissance surfacique de 19 W/m² est composé principalement de tubes fluorescents (54% de la puissance installée) dans les bureaux, de luminaires halogènes (24% de la puissance installée) dans l'escalier et le hall central et d'ampoules à incandescence (22%) dans les couloirs. Tous les circuits sont sur interrupteur sans minuterie.

Hors période de congés, une douzaine de personnes travaillent en permanence dans le bâtiment. Les autres personnels au nombre de 8 environ, sont présents occasionnellement.

2.1.5 Equipements de climatisation

La climatisation est assurée par un ensemble de 11 climatiseurs à détente directe indépendants, simples ou doubles, de différents constructeurs, et dont les puissances frigorifiques vont de 1.8 à 3.5 kW. Les unités extérieures sont situées sur console en façade ou au sol (pour 2 unités), certaines étant exposées directement à l'ensoleillement. Toutes ces unités sont correctement ventilées sauf 1 unité (au sol) autour de laquelle se trouvent divers objets pouvant limiter les échanges par diminution du flux d'air.

Les unités intérieures sont situées en applique murale à une hauteur de 2 m à 2.50 m à l'exception de celles de la salle de réunion de type console fixée en partie basse du mur. La commande de chaque ventilo-convecteur s'opère à l'aide d'une télécommande sans fil, agissant sur le choix du régime de soufflage (avec ou sans refroidissement), la vitesse de soufflage, la position du volet de soufflage permettant de régler la direction du flux d'air et enfin la température de consigne.

Les liaisons frigorifiques entre le compresseur et l'unité intérieure sont faiblement isolées, voire pas du tout à certains endroits comme par exemple près des raccordements au condenseur. On observe, en outre, que les canalisations aller et retour sont placées dans la même gaine d'isolation. Les condensats sont rejetés à l'extérieur sur le sol, en pied de façade.

On note également que certaines canalisations d'évacuation de condensats débouchent sur la base des piliers de l'ossature bois, et constituent une source potentielle de dégradation du bâti. Ce dernier point donne une idée générale de la qualité de l'installation qui a été réalisée un à deux ans après la construction du bâtiment.

2.1.6 Fonctionnement et utilisation des locaux

Les portes de communication entre les locaux sont rarement fermées, à l'exception de la porte donnant sur le couloir et menant à la salle de réunion. La porte d'entrée en façade Nord est souvent maintenue ouverte, afin de créer, selon les utilisateurs, un courant d'air.

La salle de réunion est peu utilisée.

Utilisation de la climatisation, satisfaction des occupants

Les occupants disent utiliser modérément la climatisation sauf dans 3 cas spécifiques :

- Le local informatique qui est climatisé 24/24 h y compris le week-end.
- Le Bureau d'étude situé en pignon Est, directement sous la toiture (sans comble).
- La salle de réunion décrite plus haut, fortement exposée à l'Est et également situé sous toiture sans combles. Les utilisateurs veillent à mettre en marche le climatiseur bien avant l'utilisation de la salle car il est peut-être sous dimensionné.

Les utilisateurs sont plutôt satisfaits de la climatisation, n'ont pas de critique précise à en faire à l'exception notable de celle de la salle de réunion mentionnée plus haut dans laquelle les conditions de travail deviennent difficile l'après-midi.

Les deux personnes travaillant dans le bureau double du rez-de-chaussée (angle Sud-Est) disent n'utiliser jamais la climatisation, et ouvrir largement les fenêtres du bureau, et ceci pendant la période de climatisation.

On note également que les fenêtres de certains bureaux restent ouvertes alors que leur climatiseur est en fonctionnement.

2.2 MARSEILLE 1



2.2.1 Bâtiment

Le bâtiment est situé en centre ville. Il est de construction ancienne (1950 environ) en maçonnerie lourde et comprend 3 niveaux sur terre-plein, le rez de chaussée est en partie enterré du fait de la forte pente naturelle du terrain.

Le bâtiment étudié est une annexe du bâtiment principal situé dans la même cour. Ce dernier n'a pas été suivi.

Le bâtiment suivi abrite deux services distincts :

- à RdC et une grande partie de R+1 : Secteur Education : personnel technique de l'enseignement primaire
- à R+1 (hall donnant sur la cour intérieure et 1 bureau) et à R+2 : bureau d'étude direction des bâtiments administratifs et culturels.

On peut immédiatement remarquer que la typologie des trois niveaux est assez différente.

Le premier niveau en rez de chaussée est complètement enterré sur ses orientations Nord Ouest, Nord Est et mitoyen sur son pignon Ouest. La façade sud-est donne sur une rue très passante, la rue d'Endoume.

Le second niveau (R+1) donne de plain-pied sur une cour intérieure en façade Nord Ouest et Nord Est. On notera que ce niveau est, en fait, un ancien préau ouvert (piliers béton section circulaire) réaménagé en bureaux.

Le niveau supérieur (R+2) est situé sous un comble non aménagé.

Le bâtiment est compact, sans décrochement ni retour de façades.

Celles-ci sont construites en maçonnerie lourde, probablement en pierre (épaisseur 0.50m) et ne comportent pas d'isolation. La toiture en tuiles protégeant des combles comporte une isolation déroulée de faible épaisseur (50 mm environ) et fortement dégradée.

L'inertie est constituée par la dalle sur terre-plein, les murs périphériques enterrés sur 2 orientations en rez de chaussée, les planchers intermédiaires et escaliers en béton, et les cloisons lourdes. Elle est de type lourd. Le ratio surface des masses / surface au sol est de 2,5.

2.2.2 Orientation - Ensoleillement - Vitrages

L'axe longitudinal du bâtiment suivi est orienté Sud - Ouest / Nord - Est .

La façade Sud-Est est bien protégée en début de matinée par un front d'immeubles de hauteur sensiblement identique au bâtiment, situés de l'autre côté de la rue d'Endoume. Pendant le reste de la matinée la façade est très exposée. Les ouvertures, de surface assez importante pour les niveaux rez de chaussée et R+2, comportent des protections solaires extérieures: volets roulants au rez-de-chaussée et brise-soleil en bois à R+2.

La façade Nord-Ouest, munie à R+1 de grandes ouvertures vitrées, est très exposée l'après-midi. Quelques arbres dans la cour, ainsi que le bâtiment principal, procurent un ombrage tard dans l'après midi.

Les ouvertures du bureau Nord Ouest à R+1 comportent des stores intérieurs à bandes verticales de couleur claire.

Les pignons sont borgnes, à l'exception d'une porte vitrée au Nord Est.

Les menuiseries en bois, en aluminium sans rupture de pont thermique ou en PVC sont à simple vitrage et très perméables à l'air.

La toiture ne comporte pas d'ouverture transparente.

Le ratio surface vitrée / surface au sol est de 19%.

2.2.3 Ventilation

Le bâtiment suivi ne comporte pas de ventilation mécanique contrôlée à l'exception d'un système de VMC double flux avec échangeur à plaques situé à R+1 et desservant le grand bureau Nord Ouest. La prise d'air neuf ainsi que le rejet d'air vicié sont situés en façade Sud Est. Le soufflage et la reprise d'air se font en plafond du local Nord ouest. Cette VMC fonctionne de façon intermittente. On verra plus loin son mode de fonctionnement lié (par erreur) à celui d'un ventilo-convecteur.

On observe donc que les besoins de ventilation sont assurés par deux éléments : une très forte perméabilité des ouvrants, principalement à R+2, et un recours à l'ouverture des fenêtres.

2.2.4 Apports internes

Les apports internes électriques sont générés par les équipements principaux suivants :

- l'équipement informatique est rare (5 PC + 2 imprimantes laser).
- 2 photocopieuses.
- Eclairage :
 - RdC : puissance installée 1940 W éclairage naturel insuffisant ou inexistant.
 - R+1 : puissance installée 1620 W.
 - R+2 : puissance installée 1550 W.

L'éclairage installé d'une puissance surfacique de 9 W/m² est composé principalement de tubes fluorescents et de spots halogènes, respectivement 79% et 10% de la puissance installée.

Il faut noter pour mémoire la présence d'au moins deux convecteurs électriques, placés respectivement à l'accueil (RdC) et à l'entrée Nord (R+1), avec leur thermostat en position 3 et 5. Lors de notre intervention ces radiateurs n'étaient pas en fonctionnement mais on peut légitimement penser que lorsque la température extérieure baisse en dessous de 20°C par exemple en fin de nuit au mois de septembre, ils pourraient se mettre en marche.

2.2.5 Equipements de climatisation

La climatisation est assurée par un système centralisé à détente directe pour l'ensemble du bâtiment suivi. La production est réalisée par 2 groupes Daikin VRV (20 et 40 kW de puissance frigorifique) situés dans la cour à l'angle Nord Est. La distribution de fluide frigorigène chemine en faux-plafond par un réseau en cuivre calorifugé (manchon genre Armstrong de 11mm). L'émission se fait par des ventilo-convecteurs en plafond.

La commande de chaque ventilo-convecteur s'opère à l'aide d'une télécommande murale, agissant sur le choix du régime de soufflage (avec ou sans refroidissement), la vitesse de soufflage, la position du volet de soufflage permettant de régler la direction du flux d'air et enfin la température de consigne.

Pour chaque ventilo-convecteur, les condensats sont évacués par une pompe de relevage raccordée à un réseau cheminant en faux-plafond à chaque niveau, et rejoignant une chute, elle-même raccordée au réseau d'eaux usées.

La mise en œuvre des matériels est d'une manière générale très soignée, l'ensemble est très silencieux.

2.2.6 Utilisation des locaux

Hors période de congés, une dizaine de personnes travaillent en permanence au rez de chaussée.

A ce niveau on reçoit également des visiteurs occasionnels (personnel des écoles, sociétés de sous-traitance, etc...).

A R+1, il y a très peu de personnel en journée, en tout cas pendant nos visites (3 ou 4 de façon discontinue).

A R+2, 2 à 4 personnes occupent les locaux en permanence.

2.2.7 Utilisation de la climatisation, satisfaction des occupants

Les occupants disent utiliser modérément ou même pas du tout la climatisation (ne la supportant pas) sauf au bureau d'étude à R+2 où elle fonctionne constamment, soit en fonction refroidissement, soit en soufflage seul.

Les utilisateurs sont plutôt satisfaits de la température ambiante, mais nous n'avons pas rencontré de personnes travaillant dans le local Nord-Ouest à R+1, local qui est très exposé et peu protégé en fin de journée.

On note l'ouverture de certaines fenêtres, plutôt dans les locaux où la climatisation n'est pas en fonctionnement.

2.3 MARSEILLE 2



2.3.1 Bâtiment

Situé en zone périurbaine, et datant des années 70, le bâtiment suivi est construit en maçonnerie lourde sur terre-plein. Il comprend deux niveaux.

La forme générale du bâtiment est compacte sans décrochement ni retour de façade. Il est accolé à un entrepôt de stockage sur la totalité de sa paroi Nord Est.

Les façades sont réalisées en maçonnerie lourde (béton d'épaisseur 0.20m). On constate l'absence d'isolation.

La toiture est de type terrasse avec étanchéité collée de couleur noire sans gravillons. Elle comporte une isolation extérieure de 40 mm d'épaisseur sous l'étanchéité.

L'inertie apportée par les divers éléments de la construction, dalle sur terre-plein, murs périphériques, plancher intermédiaire et escalier en béton, est de classe moyenne. Le ratio surface des masses / surface au sol est de 1,8.

2.3.2 Orientation - Ensoleillement - Vitrages

L'axe longitudinal du bâtiment est orienté Sud Est - Nord Ouest. Les masques lointains sont faibles.

On notera la présence d'un arbre situé au pied du bâtiment à l'angle Sud apportant un fort ombrage sur une partie des façades Sud Est et Sud Ouest.

L'ensemble des menuiseries est en PVC. Elles sont équipées pour moitié avec du simple vitrage et sont assez perméables.

La totalité des menuiseries est équipée de volets roulants extérieurs en PVC de couleur claire, très utilisés.

La toiture est complètement ensoleillée, à l'exception d'une petite partie à l'angle Sud bénéficiant de l'ombrage de l'arbre évoqué précédemment. Cette toiture est équipée de deux ouvertures zénithales type skydome de surface unitaire de 1 m², donnant dans des locaux annexes, photocopie et rangement.

Le ratio surface vitrée / surface au sol est de 12%.

2.3.3 Ventilation

Le bâtiment ne comporte ni système de ventilation mécanique, ni équipements de ventilation naturelle. Le renouvellement d'air est assuré par l'ouverture des fenêtres.

2.3.4 Apports internes

Les apports internes électriques sont générés par les équipements principaux suivants :

- 12 postes informatiques,
- 3 imprimantes laser,
- 1 armoire avec serveur informatique, puissance mesurée : 600W.
- 2 photocopieuses.
- Eclairage :
 - RdC : puissance installée 2430W
 - R+1 : puissance installée 1870W

L'éclairage naturel est plutôt faible, sauf en partie Nord Ouest.

L'éclairage électrique intérieur d'une puissance surfacique de 10 W/m² est composé en grande majorité de tubes fluorescents (90% de la puissance installée) dans les bureaux. Tous les circuits sont sur interrupteur sans minuterie.

Il faut noter que la totalité de l'éclairage des bureaux et le couloir à R+1 est placée sur un seul circuit de commande. En conséquence lorsqu'un seul bureau est occupé et éclairé cela représente un apport interne d'une puissance de près de 2 kW !

2.3.5 Equipements de climatisation

La climatisation est assurée par un ensemble de 21 groupes indépendants à détente directe (splits) réversibles simples ou doubles de marque Ciat, et de puissance frigorifique de 1.9 et 3.0 kW.

Les unités extérieures sont situées sur console en façade. Elles sont toutes correctement ventilées, bien que fortement exposées à l'ensoleillement.

Les unités intérieures sont situées en applique murale à une hauteur de 2 m à 2.50 m. La commande de chaque ventilo-convecteur s'opère à l'aide d'une télécommande sans fil, agissant sur le choix du régime de soufflage (avec ou sans refroidissement), la vitesse de soufflage, la position du volet de soufflage permettant de régler la direction du flux d'air et enfin la température de consigne.

Les liaisons frigorifiques entre le compresseur et l'unité intérieure sont isolées de façon minimale. Les condensats sont rejetés à l'extérieur sur le sol, en pied de façade.

2.3.6 Utilisation des locaux

Hors période de congés, une quinzaine de personnes occupent les locaux pendant les heures de travail. L'effectif est réduit pendant les mois d'été, modérément en juillet et beaucoup plus fortement au mois d'août (environ 30% du personnel).

Les portes de communication entre les locaux sont souvent fermées.

2.3.7 Utilisation de la climatisation, satisfaction des occupants

Les occupants sont satisfaits de la climatisation qu'ils utilisent largement. On note l'ouverture de certaines fenêtres dans les bureaux, ainsi que la porte d'entrée dans le hall et ceci pendant la période de climatisation.

2.4 TOULON 1



2.4.1 Bâtiment

Le bâtiment datant des années 1960/1970 est situé en centre ville au bord du port. Il est constitué d'une structure poteaux-poutre en béton sur 2 niveaux. Le rez-de-chaussée de plain pied est bâti sur terre plein.

Le bâtiment suivi est peu compact. Ceci est dû à deux caractéristiques de construction : d'une part le plan du rez de chaussée est décalé par rapport à celui du premier étage, et donc il possède un plancher haut supportant une terrasse accessible. D'autre part le premier étage surmonte 2 passages piétons traversant l'immeuble et ouverts sur l'extérieur. Ces passages représentent environ 25% de la surface de ce niveau.

Les façades sont composées d'ensembles menuisés largement vitrées avec structure en alu et allège en panneaux de particules. Les allèges du rez-de-chaussée ne comportent pas d'isolant, au contraire de celles du R+1 dont l'épaisseur laisse supposer une isolation estimée à 40 mm d'épaisseur

La toiture terrasse du rez de chaussée possède une isolation en sous-face réalisée par panneaux de polystyrène de 100mm d'épaisseur.

Celle à R+1, non accessible, est apparemment non isolée et comporte uniquement une couche de gravillons recouvrant l'étanchéité et la dalle.

L'inertie du bâtiment, principalement constituée par une dalle sur terre plein en rez de chaussée, un plancher intermédiaire en béton et une dalle béton en toiture, est de classe moyenne. Le ratio surface des masses / surface au sol est de 1,8.

L'entrée principale du public au rez de chaussée est munie d'un sas de 1,70 m de profondeur.

A ce niveau on trouve un grand hall pouvant accueillir plusieurs dizaines de personnes ainsi qu'un petit bureau.

Le premier étage est composé d'un hall central, recevant du public, autour duquel se distribuent une quinzaine de bureaux, eux-mêmes ceinturés par un couloir périphérique donnant sur la paroi extérieure. Il n'y a pas de porte entre les bureaux et le couloir périphérique.

2.4.2 Orientation - Ensoleillement - Vitrages

L'axe longitudinal du bâtiment suivi est orienté Nord Sud.

On note l'existence de masques lointains dus à la présence de plusieurs bâtiments, et notamment :

- 2 immeubles R+7 contigus au bâtiment suivi: l'un à l'angle Sud-Est (mitoyen avec le local archives) et l'autre à l'angle Nord-Ouest (mitoyen avec le bureau du chef de centre).

- 2 immeubles R+23, l'un au Sud occasionnant un ombrage qui atteint le bâtiment suivi à partir de début Août, et l'autre situé à l'Ouest apportant un ombrage en fin de journée.

Les vitrages dont la surface totale est très importante - près de 50% de la surface des façades - sont répartis de manière quasi égale sur les 4 façades du niveau R+1 et orientés uniquement à l'Est et au Nord au rez de chaussée.

L'ensemble des menuiseries est en aluminium sans rupture de pont thermique et reçoit majoritairement du double vitrage 4/6/4 en R+1 et du simple vitrage au rez de chaussée.

Ces menuiseries sont de grandes dimensions et sont placées au nu extérieur de la façade.

Les vitrages sont équipés de protections solaires intérieures (stores à bandes verticales), et extérieures (volets roulants); ces deux équipements sont de couleur claire.

Les volets roulants sont automatiquement fermés en dehors des heures de bureau (mais ne peuvent pas être commandés manuellement). On notera qu'à R+1 les coffres de volets roulants associés à un débord de toiture forment une casquette d'environ 30 cm de profondeur par rapport au plan du vitrage.

Le ratio surface vitrée / surface au sol est de 29%.

2.4.3 Ventilation

La ventilation des locaux est de type simple flux, mise en action par 2 groupes indépendants en terrasse. L'air neuf transite dans les coffres de volets roulants et est introduit par des bouches en faux plafond. L'extraction est réalisée dans les bureaux, les halls et les sanitaires.

2.4.4 Apports internes

Les apports électriques internes sont générés par les équipements principaux suivants :

- 22 postes informatiques : 1 PC par bureau + 3 à l'accueil + 2 serveurs.
- Dans le local informatique: 1 onduleur de capacité 15kVA et une armoire télécom
- 5 photocopieuses
- 1 borne interactive accessible au public au Rdc (entre sas et bureau mitoyen - puissance mesurée de 180W continue).
- Eclairage :
 - RdC : Puissance installée 644 W,
 - R+1 : Puissance installée 4600 W.

L'éclairage électrique intérieur, d'une puissance surfacique installée de 8,2 W/m², est composé à 71% de tubes fluorescents (bureaux) et à 23% de lampes fluo-compactes (halls et circulations), les 6% restants sont des ampoules à incandescence.

L'éclairage naturel est très important au niveau R+1 dans les bureaux et le couloir périphérique et insuffisant dans le hall à R+1 ainsi que pour tout le rez de chaussée.

Hors périodes de congés, 17 personnes travaillent en permanence dans les bureaux.

2.4.5 Equipements de climatisation

La climatisation est assurée par un groupe de production d'eau glacée de marque Trane modèle CXA250SM d'une puissance frigorifique de 65 kW situé à l'extérieur en toiture. Le réseau de distribution d'eau glacée chemine tout d'abord en toiture pour pénétrer ensuite dans un petit édicule pour rejoindre le faux plafond. Ce réseau est correctement calorifugé.

L'émission est réalisée par un ensemble de 29 ventilo-convecteurs de marque Wesper de type cassette ou applique en plafond. La commande de chaque ventilo-convecteur s'opère à l'aide d'un boîtier mural, agissant sur le choix du régime de soufflage (avec ou sans refroidissement), la vitesse de soufflage et enfin la température de consigne. Les ventilo-convecteurs servent aussi d'émetteurs de chaleur en période de chauffage.

Il faut souligner l'installation de 4 ventilo-convecteurs supplémentaires dans le couloir périphérique à R+1, pendant la période de mesure en septembre 2001.

Pour chaque ventilo-convecteur, les condensats sont évacués par une pompe de relevage raccordée à un réseau cheminant en faux-plafond à chaque niveau, rejoignant une chute elle-même raccordée au réseau d'eaux usées.

En outre on trouve également un climatiseur de type split double de marque Daikin dans le local informatique à R+1. Le compresseur, de 9 kW de puissance frigorifique, est placé en toiture.

2.4.6 Utilisation des locaux

Comme on l'a vu 17 personnes travaillent en permanence dans les bureaux. Le bâtiment suivi accueille en outre du public de 9h00 à 15h30. Le nombre de visiteurs présents est fortement variable, de quelques personnes à 30 voire 40 personnes.

La valeur moyenne retenue dans l'étude est de 20 personnes pour le public.

2.4.7 Utilisation de la climatisation, satisfaction des occupants

La climatisation est fortement utilisée. Le personnel n'est pas satisfait de la climatisation, en particulier à l'étage. C'est la raison pour laquelle plusieurs ventilo-convecteurs ont été ajoutés comme il a été dit plus haut.

Le système de climatisation principal est géré par une horloge de programmation autorisant le fonctionnement des ventilo-convecteurs les jours de semaine de 6 h à 18 h. (0h le lundi matin) et celui du groupe froid entre 7 h et 20 h environ.

Le local informatique est climatisé en permanence avec une consigne de 18°C non atteinte.

2.5 TOULON 2



2.5.1 Bâtiment

Le bâtiment datant des années 1969/1970 est situé en centre ville dans un quartier de constructions élevées, et mitoyen avec un autre bâtiment sur son pignon nord-est. Il comprend 5 niveaux au dessus d'un parking en sous-sol. Le rez de chaussée de plain pied, est accessible par deux sas : celui du public au sud-est et celui du personnel au nord-ouest. Le R+1 recouvre la rampe d'accès au parking du sous-sol. La surface du niveau R+4 est de moitié inférieure à celle des autres niveaux.

La structure du bâtiment est de type poteau-poutre en béton avec, pour les niveaux R+1 à R+4, des façades constituées de panneaux béton préfabriqués probablement non isolés.

La toiture terrasse est non accessible, sauf pour les opérations de maintenance, et non isolée. Elle est simplement recouverte d'une étanchéité et de gravillons à R+3 (sur 50% environ de sa surface) et à R+4.

L'inertie du bâti est lourde grâce aux planchers intermédiaires béton, à la dalle béton en toiture ainsi qu'aux façades. Le ratio surface des masses / surface au sol est de 2,5.

2.5.2 Orientation - Ensoleillement - Vitrages

L'axe principal du bâtiment est orienté nord-est sud-ouest. Les principaux vitrages sont dirigés vers le sud-est, le sud-ouest et le nord-ouest.

Les ouvertures vitrées sont de deux types :

- au rez de chaussée, les façades sont entièrement constituées d'ensembles menuisés en aluminium largement vitrés (simple vitrage) avec allèges en panneaux de particules minces non isolés. Les vitrages sont équipés de films réfléchissants sur environ la moitié de leur surface,
- en étage, les fenêtres également en aluminium sans rupture de pont thermique, sont équipées de double vitrage 4/6/4 teinté. Les allèges sont identiques à la façade.

La toiture est exposée avec seulement un masque à l'est du fait d'un bâtiment R+19 mitoyen.

Des brise-soleil horizontaux à lamelles ont été installés au rez de chaussée sur la façade sud-est. Cette façade est également partiellement protégée de l'ensoleillement par quelques arbres atteignant le niveau R+2. Les façades sud-ouest et surtout nord-ouest reçoivent l'ombrage des bâtiments voisins en fin de journée.

Le ratio surface vitrée / surface au sol est de 14%.

2.5.3 Ventilation

Une ventilation mécanique double flux sans échangeur est réalisée par 2 groupes en terrasse. Une extraction supplémentaire en pièces humides est effectuée par deux autres groupes. Le débit total extrait est de 6200 m³/h.

2.5.4 Apports internes

Les équipements électriques n'ont pas été recensés de façon détaillée, mais on peut retenir les éléments suivants :

- le taux d'équipement en matériel informatique est élevé, soit environ 1 poste informatique par personne.
- le bâtiment comporte des salles informatiques conséquentes pour les serveurs et autres gros systèmes informatiques sécurisés de gestion.
- l'éclairage électrique est probablement assez utilisé à cause d'un éclairage naturel réduit (vitrage teinté ou réfléchissant) et une profondeur des locaux importante. La puissance surfacique installée est de 12 W/m² environ.
- les autres équipements sont nombreux : distributeurs de boissons (chaud et froid), photocopieuses...

2.5.5 Equipements de climatisation

La climatisation est assurée par un groupe centralisé à eau glacée de marque Ciat modèle LCM1000 de 250kW de puissance frigorifique, placé en toiture. La distribution d'eau glacée est assurée par un réseau calorifugé. Un total de 104 ventilo-convecteurs de marque Wesper type console équipent les bureaux et permettent le rafraîchissement l'été et le chauffage l'hiver. Les commandes sont murales individuelles ou souvent directement au niveau des ventilo-convecteurs.

5 groupes indépendants à détente directe assurent en outre la climatisation des salles informatiques et de la salle onduleur.

2.5.6 Utilisation des locaux

Hors périodes de congés, 80 personnes travaillent en permanence. Cet établissement reçoit du public (professionnels uniquement) mais apparemment en nombre très restreint.

2.5.7 Utilisation de la climatisation, satisfaction des occupants

Les occupants sont globalement satisfaits du confort obtenu dans le bâtiment.

2.6 MOUANS-SARTOUX



2.6.1 Bâtiment

Le bâtiment se situe en centre ville dense, en bordure d'une place ombragée. C'est un bâtiment ancien, probablement centenaire, réhabilité, constitué de quatre niveaux surmontés de combles sous toiture. Le rez de chaussée est occupé par un restaurant et n'est pas suivi.

Le bâtiment est compact à l'exception d'une petite extension en façade est, comprenant une partie de la salle de réunion et des bureaux de la police municipale, qui possède sa propre toiture.

Les façades sont constituées de maçonnerie de 50 cm d'épaisseur avec isolation intérieure rapportée de 60 mm avec plaque de plâtre. La toiture en tuile est isolée en sous face dans les combles. On note la présence d'une petite terrasse abritée en renforcement dans la toiture. Cette terrasse accueille le condenseur du groupe de climatisation, le groupe et la chaufferie étant située à proximité, sous l'autre pant de toiture.

L'inertie principalement due aux planchers intermédiaires et escaliers en béton ainsi qu'aux refends de forte épaisseur est de type moyen (du fait de l'isolation intérieure). Le ratio surface des masses / surface au sol est de 1,8.

2.6.2 Orientation - Ensoleillement - Vitrages

L'axe longitudinal du bâtiment est orienté nord-ouest / sud-est.

Les façades sont peu vitrées à l'exception de la façade nord-est de la salle de réunion mais elle bénéficie en matinée de l'ombre apportée par les arbres de la place. Le bâtiment est bordé au sud-est et au sud-ouest par des constructions ayant sensiblement la même hauteur apportant un masquage en début et en fin de journée.

Toutes les ouvertures vitrées, à l'exception de celles de l'extension décrite plus haut, sont des menuiseries bois à simple vitrage avec une forte perméabilité. Elles sont équipées, en presque totalité, de volets extérieurs à persiennes et parfois de stores intérieurs en tissu.

Les ouvertures vitrées de la salle de réunion et des bureaux de la police municipale sont constituées de simple vitrage sur des menuiseries aluminium coulissantes. Elles sont équipées de stores intérieurs à lames verticales de couleur claire.

On peut noter que le vitrage de ces fenêtres est placé de 25 à 30 cm en retrait de la façade ce qui, compte tenu de leur surface assez faible (largeur 0.95m x hauteur 1.40m), réduit considérablement la surface exposée au soleil (effet de casquette des masques proches).

La toiture est complètement ensoleillée.

Le ratio surface vitrée / surface au sol est de 13%.

2.6.3 Ventilation

La ventilation des locaux est permanente et assurée par une ventilation mécanique simple flux réalisée par 2 groupes en combles extrayant en salle de repos et en sanitaires. Le débit retenu pour l'étude est de 800 m³/h.

2.6.4 Apports internes

Les apports électriques internes sont générés par les équipements principaux suivants :

- 17 postes informatiques,
- 5 imprimantes lasers,
- 1 onduleur dans la salle de repos,
- 3 photocopieuses,
- 1 distributeur de boissons chaudes,
- éclairage d'une puissance surfacique de 9,6 W/m² se répartissant ainsi :
 - R+1 : puissance installée 1090 W,
 - R+2 : puissance installée 1720 W,
 - R+3 : puissance installée 1500 W,

Cet éclairage électrique est composé à 80% de tubes fluorescents et à 20% de lampes fluo-compactes.

L'éclairage naturel est suffisant en été mais souvent non utilisé dans la journée dans les bureaux de la façade sud-ouest à cause de l'utilisation des volets comme protection solaire.

2.6.5 Equipements de climatisation

La climatisation est assurée par un groupe de production d'eau glacée de marque Ciat modèle LGS150 placé en chaufferie dans les combles. Le condenseur, non standard, est déporté dans

une gaine de soufflage débouchant verticalement en toiture. La distribution de l'eau glacée est effectuée par un réseau bien calorifugé.

L'émission est réalisée par un ensemble de 19 ventilo-convecteurs de marque Ciat de puissance frigorifique unitaire allant de 1,5 à 3,5 kW, de type cassette situées en faux-plafond ou en coffre. La commande de chaque ventilo-convecteur s'opère à l'aide d'un boîtier mural, agissant sur le choix du régime de soufflage (avec ou sans refroidissement), la vitesse de soufflage et enfin la température de consigne.

Les ventilo-convecteurs servent aussi d'émetteurs de chaleur en période de chauffage, le circuit d'eau glacée distribuant alors de l'eau chaude préparée par une chaudière gaz.

2.6.6 Utilisation des locaux

Le bâtiment suivi abrite les services techniques de la ville : urbanisme, régie municipale de l'eau, cadastre, travaux, une salle de réunion et les services de la police municipale.

Hors période de congés, environ 25 personnes travaillent en permanence.

Le bâtiment reçoit un public peu nombreux qui peut être estimé à une moyenne de 3 à 4 personnes en permanence sur les heures ouvrées.

Les portes de communication entre les locaux et la cage d'escalier sont souvent fermées. La porte d'entrée du bâtiment, au sud-ouest ainsi que les fenêtres donnant sur la cage d'escalier sont souvent maintenue ouvertes, afin de créer un courant d'air.

La salle de réunion commune à tous les services, est peu utilisée.

Les locaux de la police municipale peuvent être occupés en dehors des heures habituelles de bureau.

2.6.7 Utilisation de la climatisation, satisfaction des occupants

La durée de la saison de climatisation est réduite et imposée par le secrétariat général de la ville. (du 29/06/2001 au 03/09/2001)

La marche des ventilo-convecteurs est asservie par 3 horloges hebdomadaires (1 par étage) activées entre 8h et 19h les jours de semaines hormis l'étage 1 autorisé les week-ends et le lundi matin dès 0h.

A une exception près les utilisateurs se disent plutôt satisfaits de la climatisation

2.6.8 Résumé des caractéristiques des bâtiments

Site	Description résumée du bâtiment	Description de l'équipement de climatisation
1 Avignon	R+1, Ossature bois, inertie légère, bien isolé, Sud et Ouest protégés, surface vitrée importante.	Groupes indépendants à détente directe.
2 Marseille 1	R+2, Bâtiment très inerte non isolé. Vitrages importants au Sud-Est et Nord-Ouest.	Groupe centralisé à détente directe (VRV). Variation de vitesse (Inverter)
3 Marseille 2	R+1, Inertie moyenne, isolation faible et toiture sombre très exposée. Vitrages peu protégés équipés de volets roulants.	Groupes indépendants à détente directe.
4 Toulon 1	R+1, Inertie moyenne, bâtiment peu compact à faible isolation. La toiture et les vitrages sont très exposés. Le site accueille du public.	Groupe centralisé à eau glacée + 1 multi split. Horloges de programmation sur ventilo-convecteurs et sur groupe.
5 Toulon 2	R+4, Inertie lourde, peu isolé. Toiture et vitrages exposés.	Groupe centralisé à eau glacée + 5 splits. Horloges de programmation sur ventilo-convecteurs et sur groupe.
6 Mouans-Sartoux	R+3, Inertie moyenne, Surfaces vitrées faibles. Isolation intérieure moyenne.	Groupe centralisé à eau glacée. Horloges de programmation sur ventilo-convecteurs.

Site	Surface masses / surface plancher	Surface vitrage / surface plancher	Surface parois extérieures / surface plancher
1 - Avignon	0,5	0,44	1,4
2 - Marseille 1	2,5	0,19	1,2
3 - Marseille 2	1,8	0,12	1,0
4 - Toulon 1	1,8	0,29	1,6
5 - Toulon 2	2,5	0,14	0,7
6 - Mouans-Sartoux	1,8	0,13	0,9

3. DESCRIPTION DES APPAREILS DE MESURES UTILISES

3.1 MATERIEL DE MESURE :

Cette étude fait appel à une grande variété de mesureurs. Ont en effet été mesurés : des températures, des hygrométries, des ensoleillements, des énergies... Les différents types d'enregistreurs sont décrits dans ce qui suit.

3.1.1 Système de mesure DIACE

Des boîtiers de mesures spécifiques sont raccordés au réseau électrique au niveau de chaque point de mesure bâtiment instrumenté. Une transmission par courants porteurs permet leur interrogation à distance. Un enregistreur central assure le stockage des données recueillies chaque 10 minutes et envoie automatiquement par liaison téléphonique les mesures à nos bureaux. Un contrôle journalier du bon fonctionnement de l'ensemble des points de mesure est donc effectué avec une grande facilité.

Grandeur à mesurer	sonde	précision
Température	Capteur numérique DS18B20	1°C absolu - appairage 0.1°C mesures chaque 10 secondes et moyenne sur 10 minutes.
Hygrométrie	Sonde de précision Honeywell HIH 3605 - Calibrée en usine.	+/- 2% RH de 0 à 100% RH mesures chaque 10 secondes et moyenne sur 10 minutes.
Présence	Capteur Infrarouge - portée d'environ 3 mètres	Mesure du temps de détection en secondes (avec délais interne de 30 secondes après une détection)
Energie	Par comptage d'impulsions issue des compteurs électriques en place	1 impulsion + précision du compteur électrique.
Energie - puissance - tension	Boîtier 16 Ampères ou pince ampèremétrique	2% de la mesure au dessus de 10 watts.
Ensoleillement	Module photovoltaïque au silicium mono cristallin.	Précision de 5%.
Débits de condensats	Débitmètre de dosage FHKSC - 1800 impulsions par litre	2% entre 0.03 et 1.5 litres par minutes.

3.1.2 Compteurs d'énergie avec renvoi d'impulsions

La majorité des systèmes de climatisation étaient équipés d'un comptage électrique en triphasé de type Schlumberger A24STI. Pour obtenir une résolution suffisante, les impulsions ont été comptées au niveau du voyant (1 impulsion lumineuse pour 62.5 Wh) et non sur la sortie émetteur d'impulsion (1 kWh par impulsion). Compte tenu des transformateurs

d'intensité employés, il est important de remarquer que les consommations inférieures à 100 watts par phase ne sont pas mesurées par ces compteurs. En particulier, les consommations de veille des systèmes split ne sont généralement pas comptabilisées en dehors des heures de présence.

Lorsque les compteurs existants n'ont pu être équipés, des compteurs d'énergie triphasé déséquilibrés de marque Electrex ont été mis en place et munis de pinces ampéremétriques ouvrables de rapport 100-1 Ampères. Ces compteurs émettent des impulsions correspondant à une énergie précise comptabilisée (10Wh - 25 Wh).

3.1.3 Lampemètres

Le Lampemètre est un enregistreur électronique de dimensions très réduites. Il peut ainsi être installé à proximité immédiate de chaque point lumineux à évaluer. Il possède un capteur optique assurant la détection des durées d'allumage de ces appareils ce qui permet un montage très rapide sans intervention sur les circuits électriques. Il suffit de le fixer à proximité de la lampe à analyser et de diriger le capteur vers la source lumineuse. Un voyant clignotant indique alors si le capteur est correctement positionné.

Entièrement autonome, il peut être laissé en place plus de 6 mois avec une fréquence de mémorisation de 10 minutes. A la fin de la période de mesure les données mémorisées peuvent être transmises à un ordinateur pour l'analyse.

Seules les durées de fonctionnement sont enregistrées. Il est donc nécessaire de mesurer par ailleurs les puissances des appareils d'éclairage (supposées constantes sur toute la durée de mesure) et de multiplier ces puissances par les durées enregistrées afin de connaître les consommations d'énergie.

3.1.4 Mesure d'ouverture des portes et fenêtres

Un appareil dérivé du modèle précédent a été développé pour connaître les durées d'ouvertures de portes ou de fenêtres. Des contacts de feuillures ont été utilisés pour indiquer l'état de fermeture. Le temps de fermeture est alors comptabilisé par période de 10 minutes.

3.1.5 Mesure d'ouverture des volets

De la même manière, des lampemètres modifiés ont été utilisés de manière à connaître la position de volets roulants notamment sur le site Marseille 2.

3.2 LISTE DES POINTS DE MESURE MIS EN PLACE A AVIGNON

Etage	Local	Mesure	Remarques
	Général	Ensoleillem ent	Horizontal, sur salle de réunion, masque en fin d'après-midi
		Hygrométrie extérieure	sur mur nord,
		Température extérieure	sous débord de toiture
		Conso. totale climatisation	Compteur ARENE, poids du pulse : 62,5Wh (Split bureau 3 non inclus)
Rez de Chaussée	Salle de Réunion	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. split	
		Conso. Ventilateur-convecteur	
		Température Soufflage Ventilateur-convecteur	
		Température Reprise Ventilateur-convecteur	
		Volume Condensat	poids du pulse : 0,555ml
		Eclairage fond	
		Eclairage fenêtre	
	Bureau 1	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. split	
		Conso. Poste Informatique	PC, imprimante laser, minitel
		Fenêtre Est	
		Fenêtre Ouest	
	Bureau 2	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Eclairage	
	Couloir	Hygrométrie	
		Température	
		Eclairage	
Entrée	Porte d'entrée		
R+1	Local Informatique	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilateur-convecteur	
	Bureau d'études	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. split	
		Température Soufflage Ventilateur-convecteur	
		Température Reprise Ventilateur-convecteur	
		Volume Condensat	poids du pulse : 0,555ml
		Consommation prises	
		Eclairage	
	Bureau 3	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. split	
		Conso. Poste Informatique	
		Eclairage	
	Couloir	Eclairage	
	Escalier	Eclairage	

3.3 LISTE DES POINTS DE MESURE MIS EN PLACE A MARSEILLE 1

Etage	Local	Mesure	Remarques
	Général	Ensoleillement	Vertical sud-est, étage 1
		Hygrométrie extérieure	Dans la gaine d'air neuf de la VMC
		Température extérieure	
		Conso. totale du groupe froid	2 compteurs ARENE additionnés, poids du pulse : 62,5W h
		Conso. d'énergie de la VMC double flux	
		Température rejet après échangeur	
		Température soufflage après échangeur	
		Température reprise bureaux	
Rez de Chaussée	Couloir	Hygrométrie	
		Température	
	Bureau 1	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Eclairage fond	
		Eclairage fenêtre	
	Bureau 2	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Eclairage	
	Hall	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Eclairage	
		Porte d'entrée	
R+1	Bureau 3	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilateur-convecteur	
		Eclairage fond	
		Eclairage fenêtre	
R+2	Bureau d'études	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilateur-convecteur	
		Température soufflage Ventilateur-convecteur	
		Eclairage	
	Bureau 4	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilateur-convecteur	
	Bureau 5	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilateur-convecteur	
		Conso. Poste Informatique	
R+1, R+2		Condensat de l'ensemble des bureaux des étages 1 et 2	poids du pulse : 0,555ml

3.4 LISTE DES POINTS DE MESURE MIS EN PLACE A MARSEILLE 2

Etage	Local	Mesure	Remarques
	Général	Ensoleillement	Horizontal, proche skydôme, léger masque tôt le matin
		Hygrométrie extérieure	Sous appuis fenêtre R+1, façade sud mais constamment ombragée
		Température extérieure	
		Conso. totale climatisation	Compteur ARENE, poids du pulse : 62,5Wh
Rez de Chaussée	Hall	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilateur-convecteur	
		Eclairage 1	
		Eclairage 2	
	Accueil	Hygrométrie	
		Température	
		Eclairage	
	Couloir	Eclairage	
	Entrée	Porte d'entrée	
		Volet	
	Bureau 1	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilateur-convecteur	
		Eclairage	
		Volet	
Bureau 2	Hygrométrie		
	Température		
	Présence		
	Conso. Ventilateur-convecteur		
	Eclairage		
	Volet 1		
Volet 2			
Bureau 3	Volet		
Couloir	Eclairage		
R+1	Local photocopies	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilateur-convecteur	
	Bureau 4	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilateur-convecteur	
		Volet 1	
		Volet 2	
	Bureau 5	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilateur-convecteur	
		Volet	
	Bureau 6	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
Conso. Ventilateur-convecteur			
Volet 1			
Volet 2			

3.5 LISTE DES POINTS DE MESURE MIS EN PLACE A TOULON 1

Etage	Local	Mesure	Remarques
	Général	Ensoleillement	Vertical sud, légers ombrages créés par immeubles proches
		Hygrométrie extérieure	Sous débord de toiture, exposition ouest
		Température extérieure	
		Conso. totale du groupe froid + auxiliaires	poinds du pulse : 10Wh
		Conso. totale des ventilo-convecteurs	
		Conso. totale d'électricité du bâtiment	poinds du pulse : 5Wh
		Température entrée air neuf	
Rez de Chaussée	Attente	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Température Soufflage Ventilo-convecteur 1	poinds du pulse : 0,555ml
		Température Reprise Ventilo-convecteur 1	
		Volume Condensat 1	
		Température Soufflage Ventilo-convecteur 2	poinds du pulse : 0,555ml
		Température Reprise Ventilo-convecteur 2	
		Volume Condensat 2	
		Porte d'entrée 1er battant (fixe)	Etat d'ouverture
Porte d'entrée battant à ressort			
Sas intérieur			
R+1	Hall	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
	Salle Informatique	Hygrométrie	
		Température	
		Conso. Split double	
	Bureau 1	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Eclairage	
	Bureau 2	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Eclairage	
	Bureau 3	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Eclairage	
	Bureau 4	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
			Température faux-plafond

3.6 LISTE DES POINTS DE MESURE MIS EN PLACE A TOULON 2

Etage	Local	Mesure	Remarques
	Général	Ensoleillement	Horizontal, façade sud, masque en début et fin de journée
		Ensoleillement derrière vitrage sud	Dans le plan fenêtre équipée de film
		Hygrométrie extérieure	
		Température extérieure	
		Conso. totale groupe froid + auxiliaires (sauf ventilo-convecteurs)	
Rez de Chaussée	Bureau 1	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilo-convecteur	
		Température soufflage Ventilo-convecteur	
	Bureau 2	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilo-convecteur	
		Température soufflage Ventilo-convecteur	
		Eclairage	
	Bureau 3	Conso. Ventilo-convecteur	
	Bureau 4	Imprimante laser	
	Espace café	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilo-convecteur	
		Température soufflage Ventilo-convecteur	
		Distributeur chaud	
		Distributeur froid	
		Eclairage	
	Hall entrée public	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Conso. Ventilo-convecteur	
		Température soufflage Ventilo-convecteur	
		Eclairage 1	
		Eclairage 2	
Hall entrée personnel	Hygrométrie		
	Température		
	Présence		
	Conso. Ventilo-convecteur		
	Eclairage		

3.7 LISTE DES POINTS DE MESURE MIS EN PLACE A MOUANS SARTOUX

Etage	Local	Mesure	Remarques
	Général	Ensoleillement	En toiture, horizontal, léger masque en fin d'après-midi
		Hygrométrie extérieure	Sous débord de toiture, exposition nord
		Température extérieure	
		Conso. totale groupe froid seul	Compteur ARENE, poids du pulse : 62,5Wh
		Conso. totale Ventilateurs R+1	
		Conso. totale Ventilateurs R+2	
		Conso. totale Ventilateurs R+3	
		Température condenseur	air en sortie du condenseur
		Pompe de circulation d'eau glacée	
R+1	Bureaux travaux neufs	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Température soufflage Ventilateur	
	Salle de réunion	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Eclairage 1	
		Eclairage 2	
	Salle de détente	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Température soufflage Ventilateur	
		Eclairage	
	R+2	Accueil Urbanisme	Hygrométrie
Température			
Présence			
Température soufflage Ventilateur			
Eclairage			
Bureau Urbanisme		Eclairage	
Bureau de formation		Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Température soufflage Ventilateur	
Couloir		Hygrométrie	
		Température	
R+3	Bureau Régie Eau	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Eclairage	
	Bureau Secrétariat DST	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Température soufflage Ventilateur	
	Bureau DST	Hygrométrie	
		Température	
		Présence	
		Température soufflage Ventilateur	
	Escalier	Fenêtre	

4. CONSOMMATIONS ET NIVEAUX DE CONFORT ATTEINT.

4.1 COMPARAISONS DES CONSOMMATIONS DES DIFFERENTS BATIMENTS

Les consommations de climatisation rapportées à la surface sont très différentes d'un bâtiment à l'autre, variant de 1 à près de 3 durant les mois de juillet et d'août entre les sites d'Avignon et de Toulon 1. On peut distinguer deux niveaux de consommation : celui des bâtiments d'Avignon, de Marseille 1, de Marseille 2 inférieurs à 140 Wh/jour/m² et celui du site de Toulon 1 dont la consommation est plus de deux fois supérieure, de l'ordre de 280Wh/jour/m². Enfin, les bâtiments de Mouans-Sartoux et de Toulon 2 possèdent une consommation intermédiaire se rapprochant davantage des bâtiments à consommation inférieure. Notons cependant que dans le cas de Toulon 2, les cinq groupes frigorifiques permettant de climatiser les locaux informatiques ne sont pas inclus dans la consommation indiquée.

La consommation maximale est atteinte dans tous les bâtiments à l'exception de Marseille 2 au mois d'août. La climatisation est dans la plupart des bâtiments arrêtée dès le mois de septembre. Cependant des consommations subsistent encore en octobre, il s'agit essentiellement de celles des pièces climatisées toute l'année comme par exemple les locaux informatiques. Dans certains cas, comme dans le bâtiment de Mouans-Sartoux, ce sont les auxiliaires telle la pompe de distribution d'eau pour les ventilo-convecteurs qui continuent à fonctionner malgré l'arrêt du groupe froid. En effet, durant l'hiver, cette même pompe véhicule la chaleur produite par la chaufferie.

4.2 REPARTITION DE LA CONSOMMATION DE CLIMATISATION

Les systèmes de climatisation des bâtiments étudiés peuvent être classés en deux groupes selon la nature du fluide distribuant le froid. Les systèmes centralisés à eau glacée, sont constitués d'un groupe froid, de ventilo-convecteurs placés dans les locaux à climatiser et d'auxiliaires tels que les pompes de distribution, ventilateurs de condenseurs... Pour les autres bâtiments, c'est le fluide frigorigène qui est directement distribué à partir d'un groupe centralisé ou de compresseurs indépendants alors généralement situés au plus près de chaque évaporateur.

La part de consommation attribuée à la seule production de froid varie en fonction de la technologie adoptée et du temps de fonctionnement des ventilo-convecteurs. Dans le cas de systèmes à détente directe, le compresseur absorbe la grande majorité de l'énergie consommée par la climatisation, environ 95%. Pour le système VRV (Marseille 1), elle est du même ordre, se situant aux alentours de 90%. Dans les systèmes centralisés à eau glacée en revanche, elle est comprise entre 70% (Mouans-Sartoux) et à peine plus de 50% dans le cas des bâtiments Toulon 1 et 2.

La contribution des auxiliaires à la consommation globale de climatisation est donc loin d'être négligeable pour les systèmes à eau glacée. En particulier, les pompes de circulation d'eau glacée (à débit constant) sont responsables de 4 (Toulon 1) à plus de 17% (Toulon 2) de la consommation totale bien qu'étant commandées par horloge.

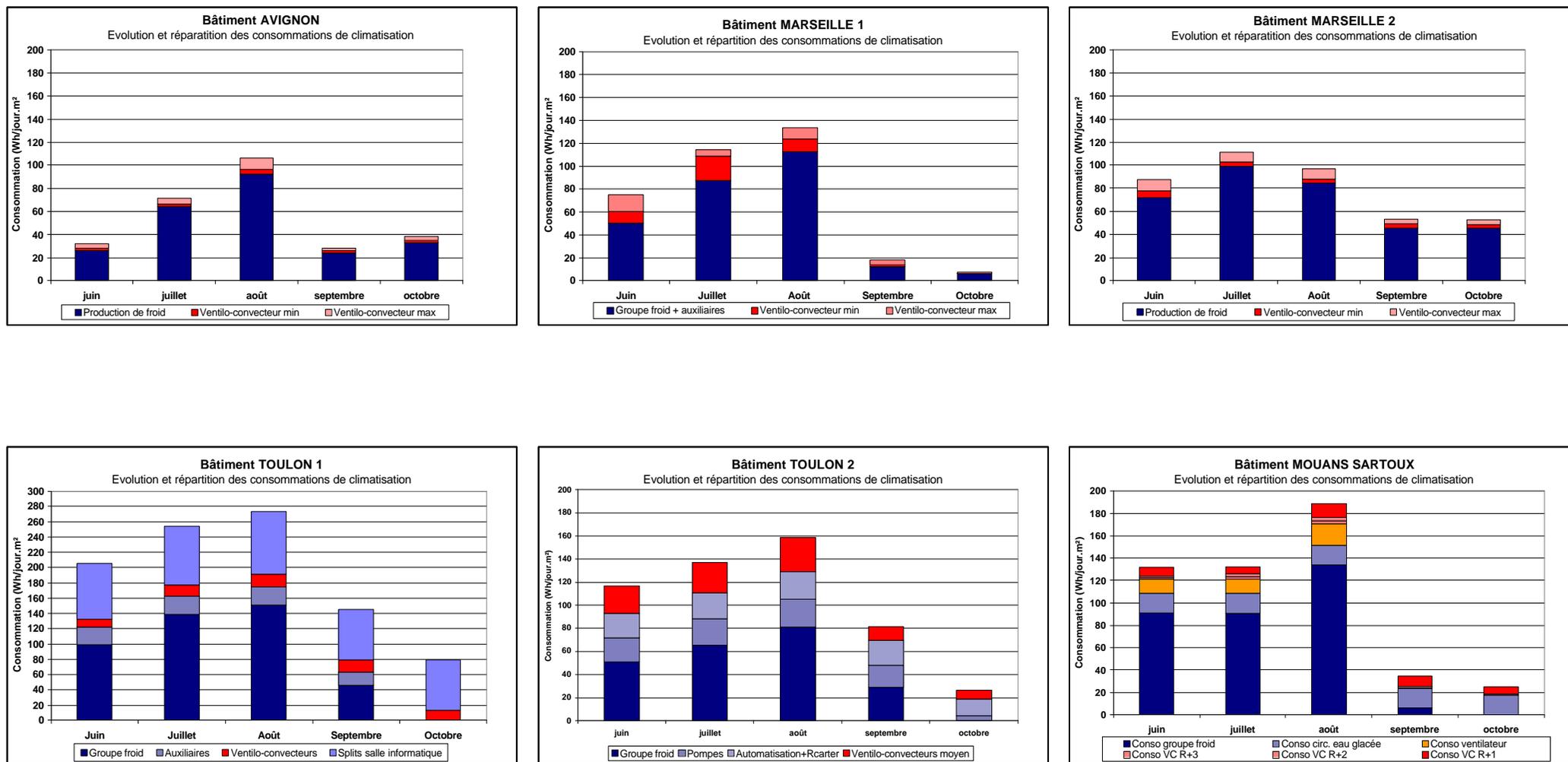


Figure 4.1 : Evolution et répartition des consommations de climatisation

La consommation des auxiliaires du système de climatisation de Toulon 2 est remarquablement élevée du fait des ventilo-convecteurs mais aussi d'une base de 2.5 kW (chauffage des carters des groupes, régulation de l'ensemble), de deux pompes de circulation d'eau glacée de 1.5 kW fonctionnant 17.5 heures pendant les jours ouvrés, et de deux pompes de 2 kW utilisées sur le circuit primaire du groupe lors de son fonctionnement.

Il faut noter que les mesures du compteur de climatisation en place dans ce bâtiment surestiment les consommations de climatisation d'un facteur 2 en raison d'une mauvaise adéquation entre les transformateurs d'intensité utilisés et le réglage du calibre compteur. Cette erreur a été corrigée dans ce rapport. Cependant, cette mesure ne comprend pas 5 climatiseurs indépendants pour les locaux informatiques.

La climatisation permanente de certains locaux tels que les salles informatiques au moyen de systèmes indépendants peut représenter une consommation considérable. Elle correspond par exemple, dans le cas du bâtiment de Toulon 1, à près d'un tiers du total.

Enfin dans la plupart des cas, la consommation de tous les ventilo-convecteurs n'a pas pu être suivie séparément. Elle a donc été estimée en appliquant à l'ensemble la durée moyenne de fonctionnement (ou dans certains cas les minima et maxima) des ventilo-convecteurs suivis.

4.3 CORRELATION DE LA CONSOMMATION AU SERVICE RENDU

4.3.1 Evaluation du niveau de confort

Les conditions climatiques diffèrent selon les sites. Les quatre bâtiments situés en bord de mer (Marseille et Toulon) bénéficient de températures légèrement plus fraîches mais aussi plus constantes. Le site d'Avignon est celui, comme le montre le tableau 4.2, où la température est la plus élevée avec une moyenne durant la journée en juillet et août de 32,2°C. L'hygrométrie moyenne mesurée est d'environ 12g d'eau par kilogramme d'air sec sauf à Toulon où elle atteint 13,5g d'eau par kg d'air sec pendant la journée.

	Avignon	Marseille 1	Marseille 2	Toulon 1	Toulon 2	Mouans- Sartoux
Surface climatisée (m ²)	420	580	480	650	2720	440
Température extérieure moyenne (°C) *	32,2	27,1	27,1	27,9	27,9	29,3
Température intérieure moyenne (°C) *	27,1	24,3	26,7	23,6	24,8	25,8
Hygrométrie extérieure moyenne (g/kg air sec) *	12,0	11,8	11,8	13,5	13,5	12,4
Hygrométrie intérieure moyenne (g/kg air sec) *	10,5	11,4	10,1	11,2	11,3	11,5
Consommation moyenne de climatisation sur la période de mesure (Wh/m ² /jour) **	109	138	122	322	170	169

* : moyennes entre 8H00 et 18H00, du lundi au vendredi

** : moyennes sur 24 heures, du lundi au vendredi

Figure 4.2 : Consommations de climatisation, hygrométries et températures moyennes quotidiennes – période : 01/07/2001-31/08/2001, jours ouvrés

Le graphique 4.3 repère les conditions hygrométriques intérieures de chaque bâtiment dans le polygone de confort utilisé par Porcher dans son cours de climatisation. Sur ce graphique apparaissent à la fois les caractéristiques de chaque lieu suivi et un profil moyen à l'échelle du bâtiment. Chaque point représente un enregistrement à 10 minutes pendant les heures ouvrées des mois de juillet et d'août (du lundi au vendredi, de 8 heures à 18 heures).

Les variations à 10 minutes des températures et hygrométries moyennes sont calculées en deux étapes. Tout d'abord, on établit, grâce aux différents points de mesures, la valeur moyenne de température et d'hygrométrie de chaque étage du bâtiment pour chaque période de 10 minutes. On fait ensuite la moyenne des différents étages pour obtenir une valeur moyenne pour le bâtiment.

Remarques :

1- Certains lieux présentant des niveaux de température et/ou d'hygrométrie très différents des autres pièces étudiées n'ont pas été pris en compte dans le calcul de la moyenne. Il s'agit de :

- la salle de réunion à Avignon
- la salle informatique à Toulon 1
- l'espace café à Toulon 2

2- Cette température est utilisée tout au long du rapport pour caractériser les conditions de température et d'hygrométrie à l'échelle des bâtiments.

3- Si l'on se réfère à la littérature, il existe d'autres polygones de confort, comme celui de l'ASHRAE (qui est fait celui du professeur danois Fanger), ou celui de l'israélien Givonni. On observe que seul le polygone de grand confort défini dans le cours de Porcher peut être comparé aux polygones de confort des autres auteurs. On devra donc considérer dans ce qui suit que seul le grand confort correspond à un résultat satisfaisant. On ne peut en effet accepter l'idée que, entre 27 et 34°C, on soit dans des zones de confort « acceptable ».

Quel que soit le bâtiment, le niveau de confort varie d'un bureau à l'autre. Le tableau 4.4 complète la figure 4.3. Il précise le pourcentage du temps pendant lequel les conditions de confort sont optimales, acceptables et hors limites (mais ce qui vient d'être dit plaide pour que « acceptable » soit rangé au même titre que hors limites). Rappelons que nous n'envisageons ici que les heures ouvrées des mois de juillet et d'août. Les valeurs données entre parenthèses sont les extrêmes rencontrés dans le bâtiment.

Bâtiment	Grand Confort	Confort Admissible	Hors limites
Avignon	29% (11%-38%)	70% (60%-83%)	2% (1%-8%)
Marseille 1	31% (18%-68%)	55% (26%-56%)	14% (5%-36%)
Marseille 2	37% (20%-60%)	63% (39%-75%)	0% (0%-6%)
Toulon 1	21% (6%-61%)	71% (34%-61%)	9% (2%-24%)
Toulon 2	32% (19%-48%)	56% (39%-64%)	12% (9%-32%)
Mouans Sartoux	29% (12%-58%)	55% (37%-68%)	16% (1%-38%)

Figure 4.4 : Récapitulatif des niveaux de confort obtenus dans les différents bâtiments - période : 01/07/2001-31/08/2001, jours ouvrés

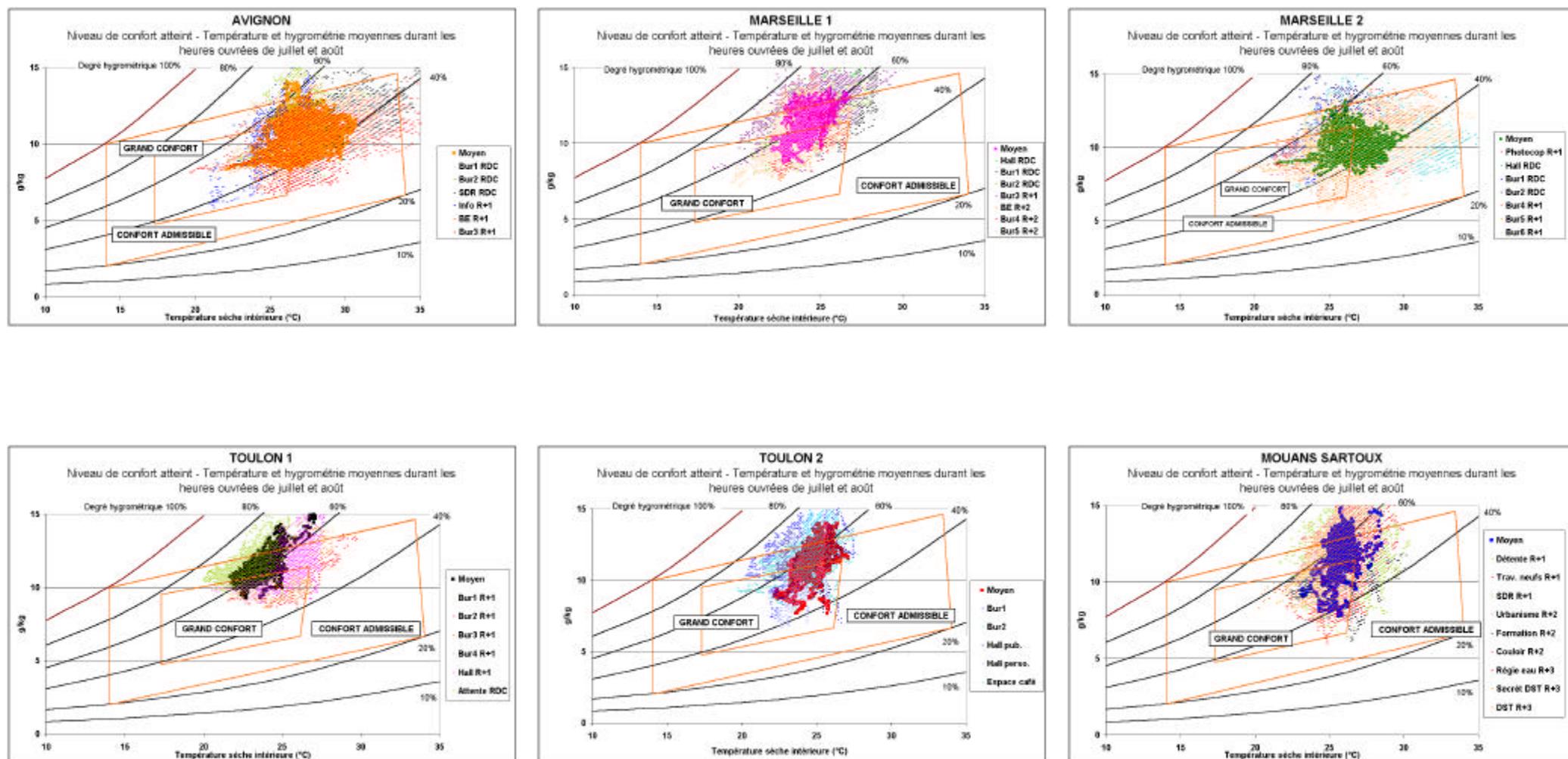


Figure 4.3 : Comparaison des niveaux de confort obtenus dans les différents bâtiments - période : 01/07/2001-31/08/2001, jours ouvrés

L'observation du graphique 4.3 et du tableau 4.4 entraîne quelques remarques :

- Un niveau de grand confort est maintenu dans tous les bâtiments environ un tiers du temps; les périodes hors limites de confort sont donc très fréquentes.
- Les différences de confort sont très importantes d'un bureau à l'autre quel que soit le bâtiment. Nous pouvons prendre l'exemple du bâtiment de Marseille 1, où 60% du temps des conditions de grand confort sont obtenues dans le bureau d'études alors qu'un bureau du rez-de-chaussée ne bénéficie des mêmes conditions que 18% du temps et qu'à contrario il est durant 36% de la période hors limites. Cette comparaison appuie le fait que la notion de confort est très subjective et donc propre à chaque individu.
- Les systèmes splits (Avignon et Marseille 2) semblent être ceux qui conduisent à une durée minimum en dehors des limites de confort.
- Les conditions les plus défavorables sont, de façon logique, rencontrées dans les lieux de passage comme les couloirs, les salles de pause, les halls d'entrée.
- Les pièces les plus confortables sont de façon surprenante les salles informatiques alors que ces lieux ne sont la plupart du temps pas occupés. Il semble que la consigne soit de maintenir une température très basse. Il paraît nécessaire de vérifier auprès des constructeurs quel est le niveau de température maximum acceptable.

Dans certains bâtiments, comme le prouve la figure 4.5, la température des étages inférieurs est généralement moins élevée. Ceci est particulièrement vérifié à Marseille 2 (à l'exception du hall du rez-de-chaussée qui n'est qu'un lieu de passage et qui est très souvent ouvert sur l'extérieur) et à Toulon 1. Ce fait s'explique par une stratification de l'air et une mauvaise isolation des planchers. Ainsi, l'air chaud qui a tendance à monter est évacué par le plafond peu isolé du rez-de-chaussée et constitue une charge supplémentaire pour le premier étage. Ce phénomène est moins visible à Avignon, Marseille 1 et Mouans Sartoux. Dans ces cas, la climatisation compense les apports supplémentaires.

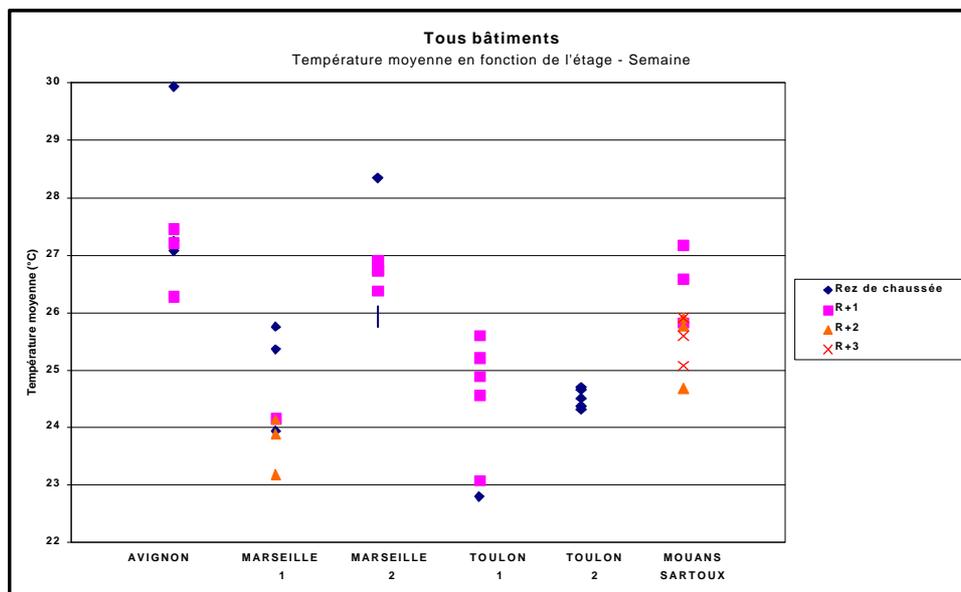


Figure 4.5 : Comparaison des températures moyennes observées en fonction de l'étage – Mois de juillet et d'août

4.3.2 Corrélation de la consommation à la température et à l'hygrométrie

Les consommations de climatisation peuvent aussi être corrélées aux conditions de température et d'hygrométrie intérieures et extérieures. Les graphiques 4.6 et 4.7 illustrent les niveaux de consommation journalière en fonction des températures intérieures et extérieures d'une part et des humidités intérieures et extérieures d'autre part. Les températures et hygrométries représentées sont les valeurs moyennes obtenues à partir des mesures effectuées dans divers lieux (bureaux, couloirs, hall...) représentatifs des bâtiments.

4.3.2.1 Bâtiment AVIGNON

Les consommations de climatisation mesurées deviennent significatives quand la température extérieure atteint 27°C. La température intérieure est alors maintenue entre 25 et 27°C. On note une consommation quotidienne permanente d'environ 20Wh/jour/m² même quand la température extérieure est basse. Il s'agit notamment de l'énergie absorbée par le groupe assurant la climatisation du local informatique.

Il apparaît que les groupes indépendants à détente directe permettent de maintenir le taux d'humidité à une valeur acceptable et ce, logiquement, quand le nombre de systèmes en fonctionnement est important. Ce fait s'explique en particulier par des températures de soufflage souvent très basses.

Le graphique 4.8 présente celles du bureau d'études comme exemple. Le niveau de ces températures est en parfaite contradiction avec tout ce qu'enseignent les cours sur le confort, à savoir que les températures de soufflage ne doivent pas être inférieures à 15 ou 16°C.

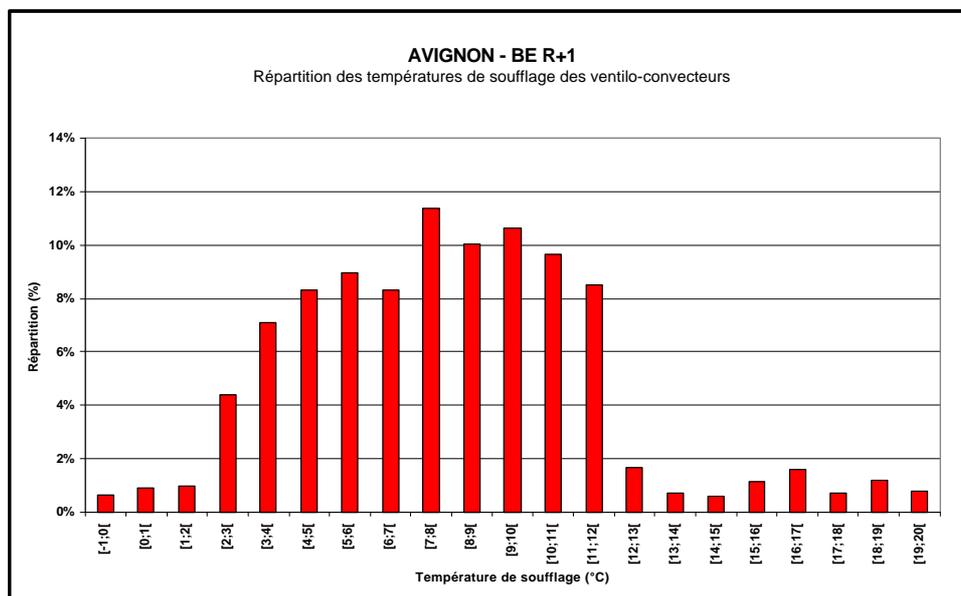


Figure 4.8 : Distribution des températures de soufflage du ventilo-convecteur du bureau d'études – bâtiment AVIGNON

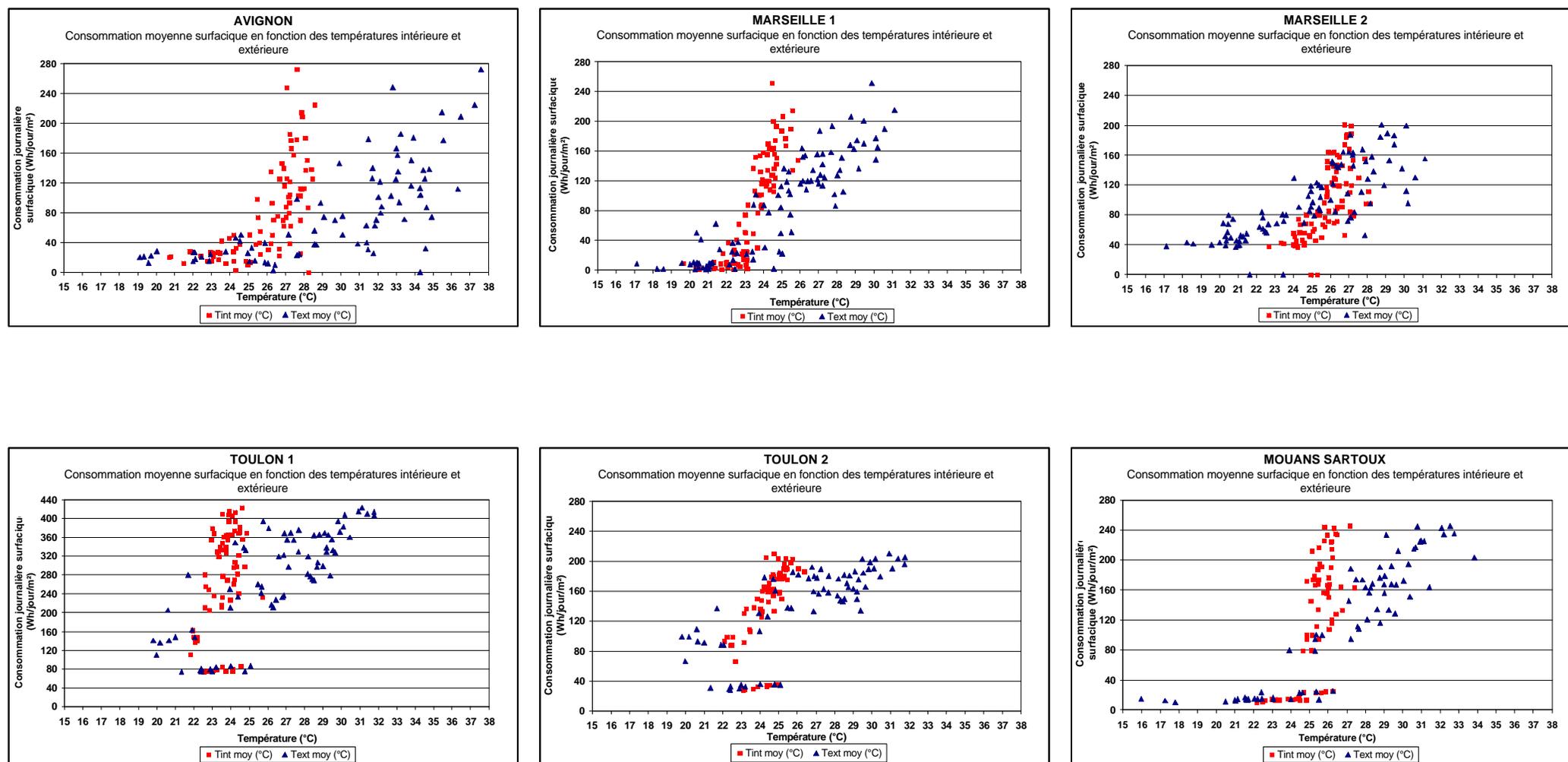


Figure 4.6 : Consommation moyenne surfacique en fonction des températures intérieure et extérieure pendant les heures ouvrées

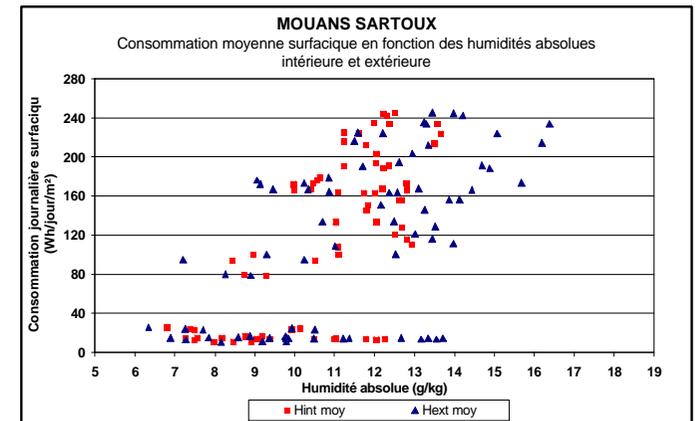
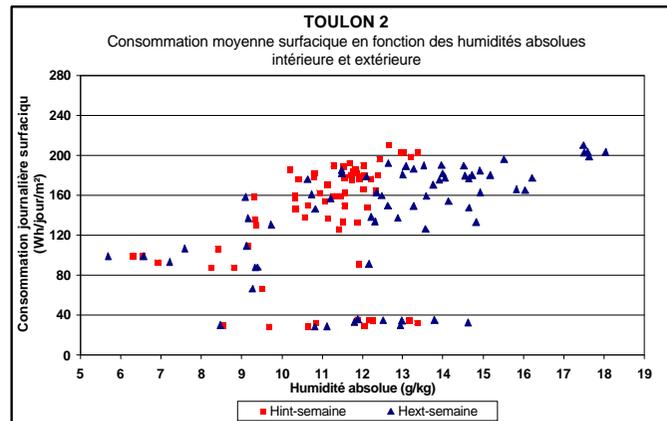
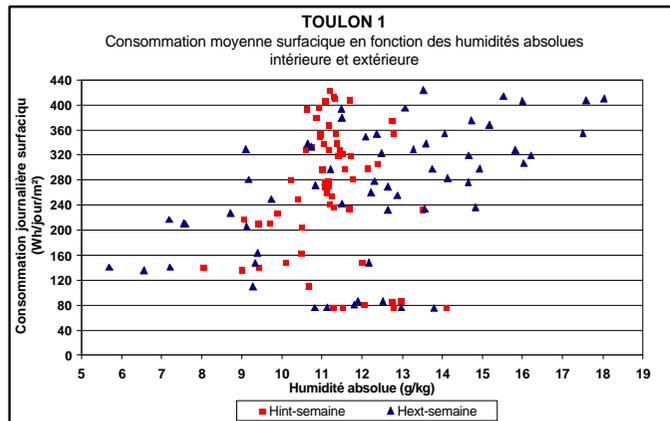
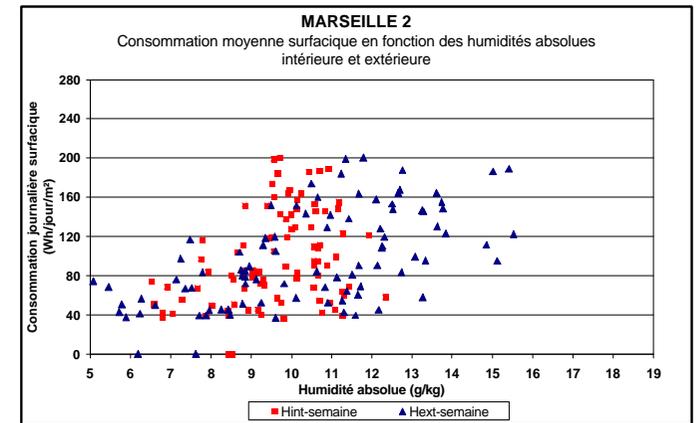
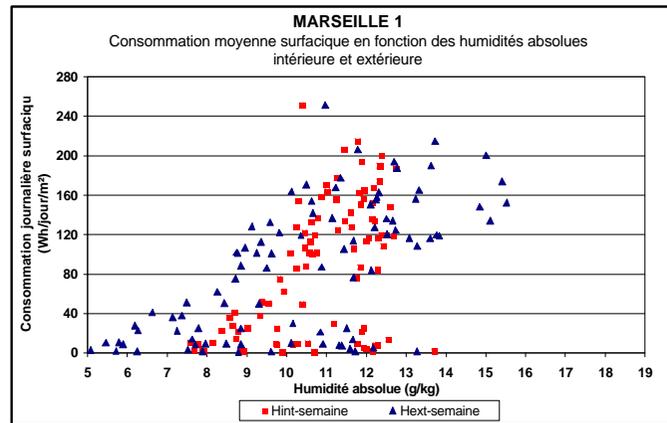
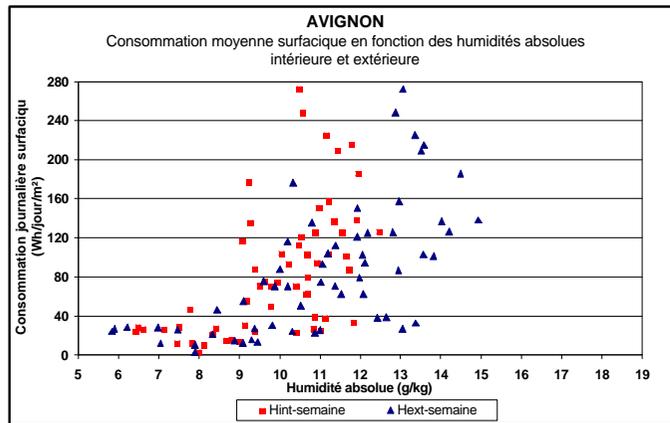
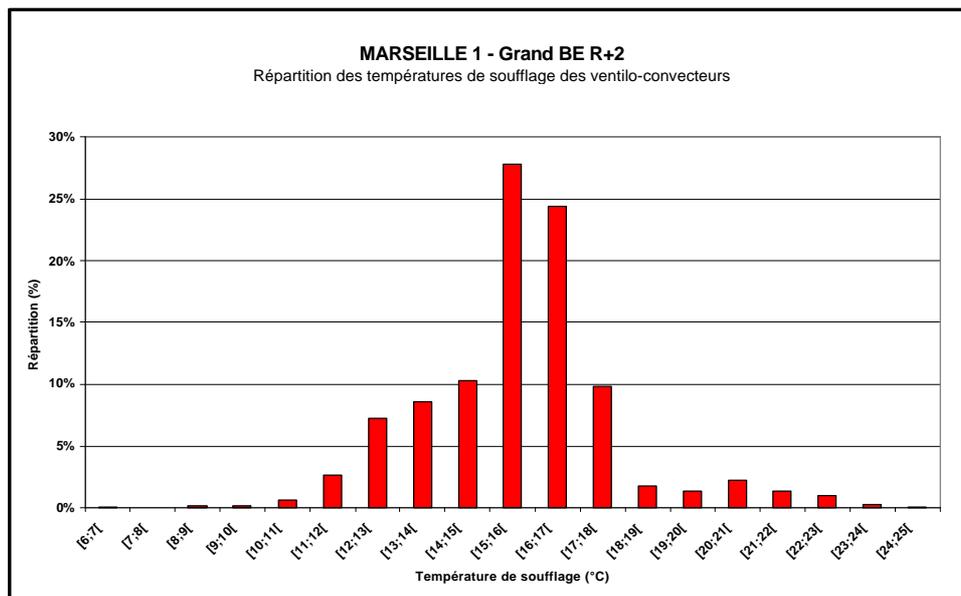


Figure 4.7 : Consommation moyenne surfacique en fonction des humidités absolues intérieure et extérieure pendant les heures ouvrées

4.3.2.2 Bâtiment MARSEILLE 1

La climatisation est activée et maintenue en fonction dès lors que la température extérieure atteint environ 24°C. L'action de déshumidification est très faible, voire même nulle jusqu'à une humidité extérieure de 12 g d'eau par kg d'air sec, traduisant une température de soufflage des climatiseurs plus élevée que sur le site d'Avignon mais sur des durées plus bien grandes, ainsi qu'un renouvellement d'air du bâtiment important. L'analyse est toutefois rendue plus difficile par le fait que le bâtiment comprend 3 étages dont les occupants ont des comportements très différents. Les personnels du deuxième étage utilisent la climatisation de manière systématique et la laissent en fonction les week-ends alors que ceux du rez de chaussée préfèrent ouvrir les fenêtres. Le premier étage est très peu utilisé.



Le maintien de températures moyennes basses implique une consommation élevée, égale à près du triple de celles des trois bâtiments cités précédemment. Cela s'explique tout d'abord par un talon de 80Wh/jour/m² imputable à la climatisation du local informatique. La seconde raison est liée aux niveaux de température atteints et au fait que le bâtiment accueille un public nombreux, source d'apports internes et d'entrée d'air neuf dans le bâtiment.

La figure 4.10 montre que la température de soufflage se situe aux alentours de 13°C, permettant d'obtenir une hygrométrie intérieure relativement faible malgré le taux d'humidité extérieure et la présence de public. Cette température de soufflage est inférieure à la valeur conseillée pour le maintien de conditions de confort satisfaisante (environ 15°C ou 16°C), elle est cependant supérieure à celle relevée à Avignon avec des systèmes splits. Ce niveau de température est, comme on le verra aussi pour les deux bâtiments suivants, caractéristique des systèmes à eau glacée.

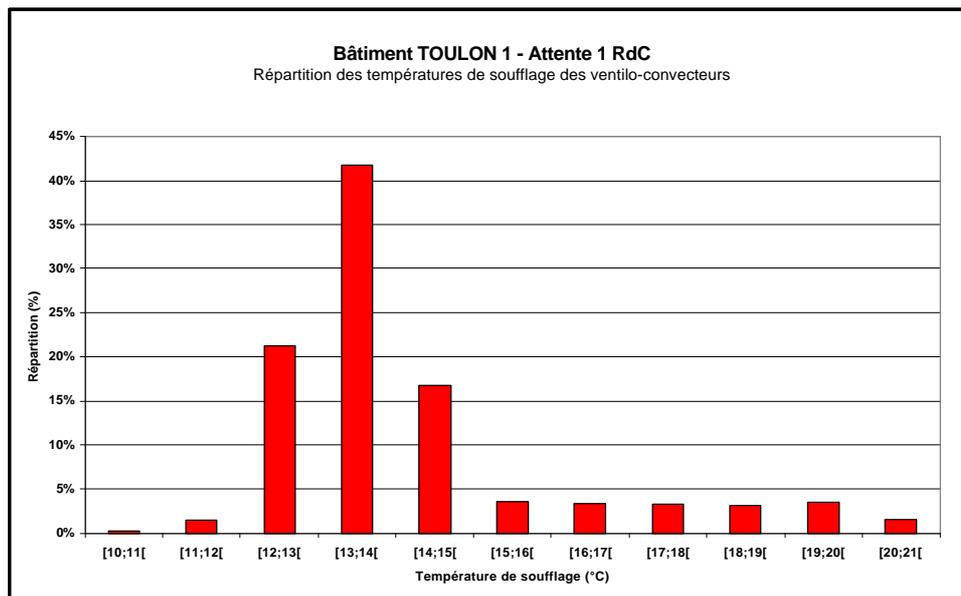


Figure 4.10 : Distribution des températures de soufflage du ventilo-convecteur du hall d'attente – bâtiment TOULON 1

4.3.2.5 Bâtiment TOULON 2

Ce bâtiment présente des similitudes avec le site de Toulon 1. En premier lieu on note une consommation permanente de 35Wh/jour/m², imputable aux auxiliaires et à la pompe de circulation. Puis la climatisation est mise en route dès une température extérieure de 20°C. A ce niveau de température, l'intérieur du bâtiment peut être maintenu à 22°C.

On observe une différence de fonctionnement avec le bâtiment de Toulon 1 quand la température et l'hygrométrie augmentent. Ainsi, la température intérieure augmente avec celle de l'extérieur. Quand l'hygrométrie extérieure s'accroît, la valeur intérieure ne peut être maintenue constante, comme pour la température elle a tendance à augmenter, restant cependant toujours inférieure à la valeur extérieure. Ce phénomène s'explique par une température de soufflage légèrement plus élevée que dans le cas précédent.

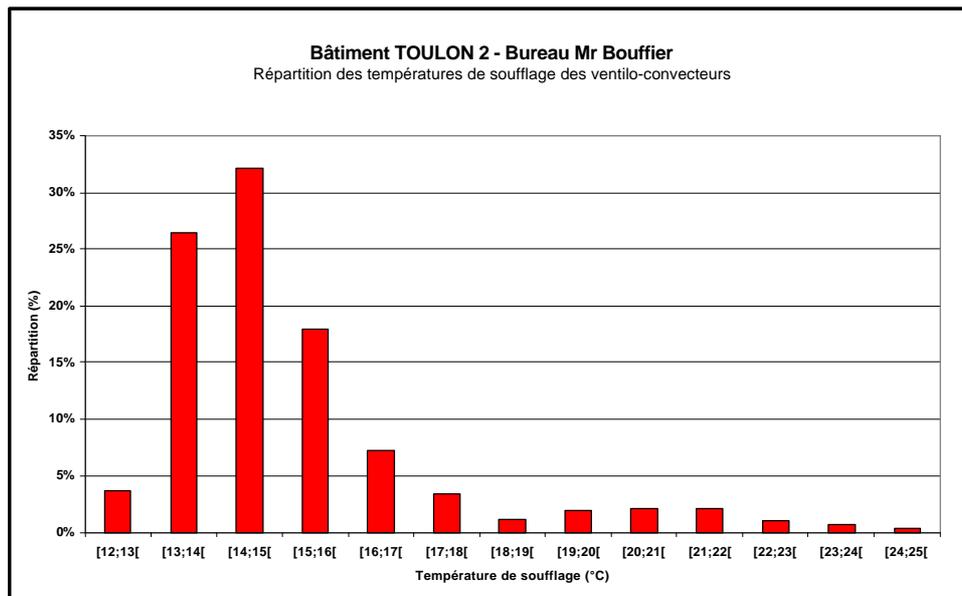


Figure 4.11 : Distribution des températures de soufflage du ventilo-convecteur d'un bureau – bâtiment TOULON 2

4.3.2.6 Bâtiment MOUANS SARTOUX

Ce bâtiment peut être qualifié d'intermédiaire. En effet, la température moyenne intérieure est de 25°C, donc plus élevée que dans les deux bâtiments de Toulon mais inférieure à celle des sites équipés de systèmes à détente directe (Marseille et Avignon). Sa consommation se situe aussi entre ces deux extrêmes. Les apports internes et/ou le renouvellement d'air sont maîtrisés puisque, avant 25°C à l'extérieur, un niveau de confort suffisant peut être maintenu sans climatisation. Le niveau de déshumidification est faible du fait d'une température de soufflage assez élevée. On remarque encore un talon de consommation durant toute la saison de climatisation qui correspond à la pompe de circulation d'eau glacée.

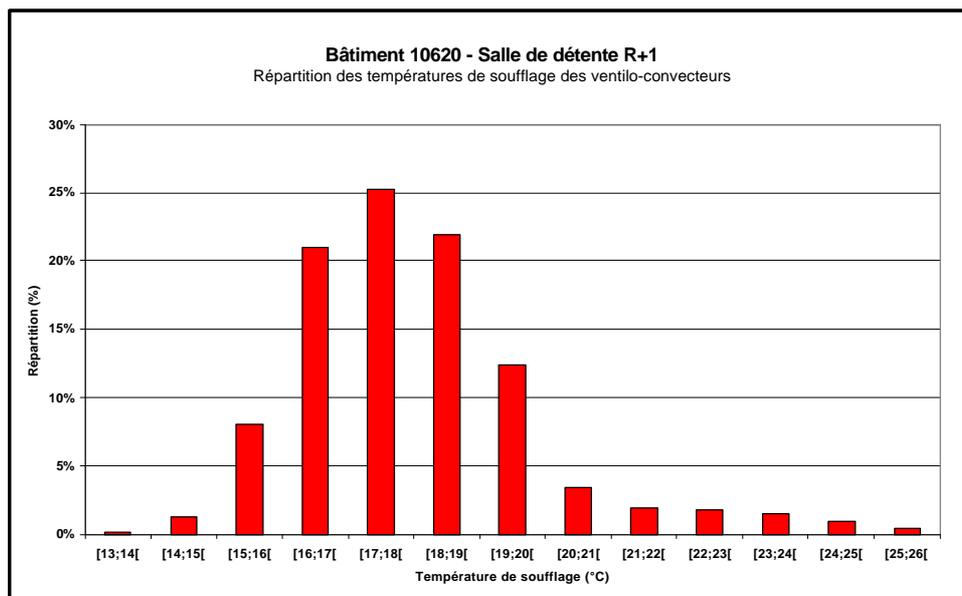


Figure 4.12 : Répartition des températures de soufflage du ventilo-convecteur de la salle de détente – bâtiment MOUANS SARTOUX

5. POIDS DE LA CLIMATISATION DANS LA FACTURE D'ELECTRICITE

Les bâtiments étudiés sont de taille et d'usage très divers, il paraît donc logique que les abonnements souscrits soient différents. Le tableau 5.1 donne la nature des abonnements et le coût de climatisation pour la période de mesures commune à tous les sites (29/06/01 au 09/10/01). Le coût de climatisation ne comprend que la consommation (kilowattheures) car la puissance de climatisation n'intervient pas dans tous les cas dans le calcul de l'abonnement. Quand elle existe, la quote part liée à la climatisation est précisée dans la figure 5.2.

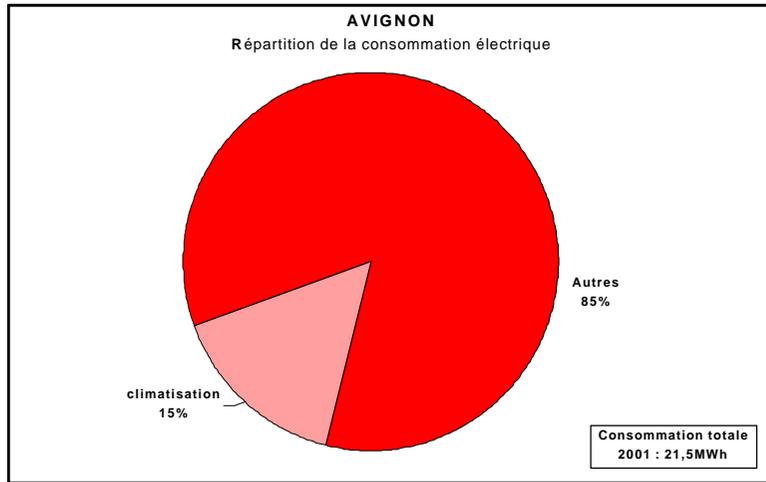
Bâtiment	Tarif	Puissance souscrite (kW ou kVA)	Début suivi	fin suivi	Coût de la climatisation (€TTC/m ²)
Avignon	Bleu simple tarif		01/06/2001	16/10/2001	0,69
Marseille 1	Jaune, moyennes utilisations	54	07/06/2001	14/10/2001	0,30
Marseille 2	Jaune, moyennes utilisations	72	09/06/2001	15/10/2001	0,32
Toulon 1	Jaune, moyennes utilisations	60	15/06/2001	10/10/2001	0,81
Toulon 2	Vert, courtes utilisations	83,1	21/06/2001	12/10/2001	0,45
Mouans Sartoux	Bleu Tempo		29/06/2001	09/10/2001	0,60

Figure 5.1 : Comparaison des coûts de climatisation des différents bâtiments pendant la période commune de mesures (29/06/2001-09/10/2001)

La figure 5.2 représente la part de la climatisation dans la consommation totale d'électricité ainsi que le coût associé pour les six bâtiments étudiés. Ces diagrammes ont été réalisés grâce aux factures EDF de l'année 2001. Seuls manquent les sites de Marseille 2 et de Mouans Sartoux pour lesquels nous ne sommes pas parvenus à obtenir les informations nécessaires. La consommation d'électricité afférente à la climatisation est calculée à partir des mesures effectuées. Elle comprend la production et la distribution de froid. Le coût total d'électricité au m² est décomposé en coût de consommation (kWh) et coût d'abonnement (kW ou kVA souscrits). Quand la puissance de climatisation représente une part de l'abonnement (et que celle-ci a pu être déterminée), la même présentation a été adoptée (coût de consommation/m² + coût d'abonnement/m²).

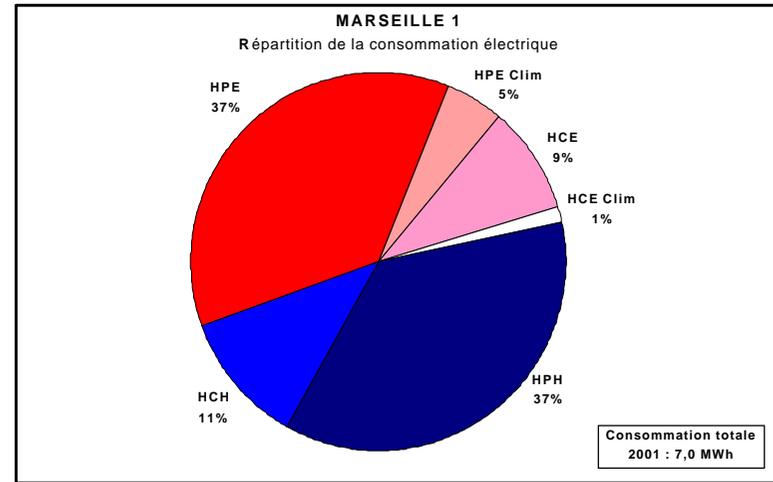
5.1 BATIMENT AVIGNON

Comme on l'a vu précédemment dans le paragraphe 4.1 la consommation d'électricité au mètre carré liée à la climatisation est une des plus faibles de l'échantillon. Elle représente cependant 15% de la facture annuelle d'électricité du bâtiment et le coût spécifique de la climatisation est un des plus élevés (0,69 €TTC/m² sur la période commune de suivi et 0,81€TTC/m² pour l'ensemble de la saison de climatisation). Ce fait s'explique par le choix d'un abonnement bleu simple tarif et donc par le prix du kilowattheure le plus élevé de toutes les tarifications EDF. Le coût d'abonnement lié à la climatisation n'a pas pu être évalué car la puissance souscrite et la puissance maximum atteinte en hiver ne sont pas connues.



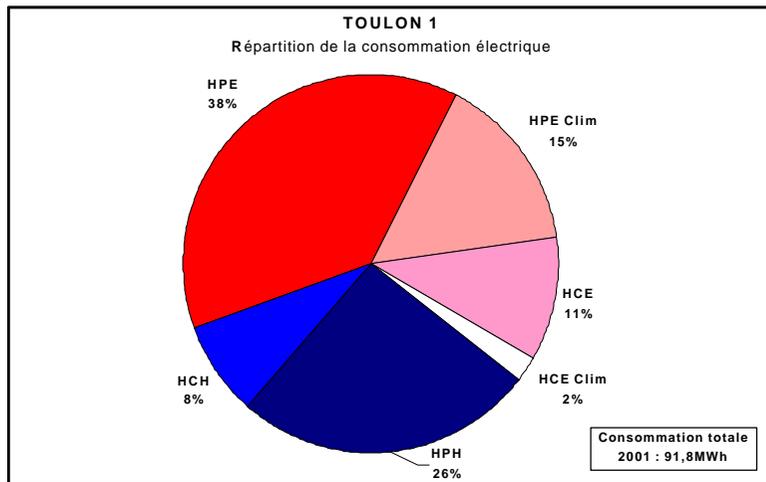
Coût de climatisation : 0,81 €TTC/m³/an

Coût total d'électricité (conso+abo) : 6,95 (5,23 + 1,72) €TTC/m³/an



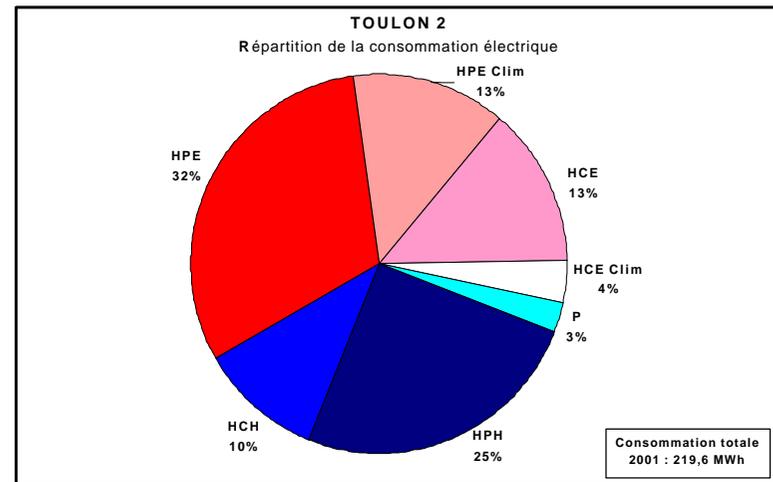
Coût de climatisation : 0,36 €TTC/m³/an

Coût total d'électricité (conso+abo) : 5,89 (5,23 + 0,66) €TTC/m³/an



Coût de climatisation (conso+abo) : 1,79 (0,92 + 0,87) €TTC/m³/an

Coût total d'électricité (conso+abo) : 11,07 (9,58 + 1,49) €TTC/m³/an



Coût de climatisation : 0,51 €TTC/m³/an

Coût total d'électricité (conso+abo) : 5,52 (5,00 + 0,52) €TTC/m³/an

Figure 5.2 : Part de la climatisation dans les différentes tranches horo-saisonnnières de la consommation électrique annuelle

5.2 BATIMENT MARSEILLE 1

Il s'agit du bâtiment bénéficiant du prix de climatisation au mètre carré le moins élevé. De plus, la climatisation ne représente que 6% de la consommation totale. Cependant ces résultats doivent être nuancés. En effet, la consommation totale d'électricité relevée correspond à deux bâtiments. Or nous n'en avons suivi qu'un (580m²) et le second (750m²) possède aussi une climatisation. Sur la figure 5.2, le coût d'électricité est donc ramené à la surface totale (1330m²) alors que le coût de climatisation s'applique à la surface suivie (580m²).

La faible part de consommation représentée par la climatisation s'explique donc à la fois par le fait que l'on n'a pas suivi l'ensemble de la climatisation mais aussi par l'utilisation de l'électricité comme énergie de chauffage dans une partie du bâtiment.

L'observation des factures EDF de l'année 2001 conduit à s'interroger sur la pertinence du choix de l'abonnement et des puissances souscrites. La puissance souscrite est en effet de 54kVA (tarif jaune, moyennes utilisations). Le tableau de la figure 5.3 donne les puissances maximales atteintes dans les différentes tranches horo-saisonniers (puissances relevées sur les factures EDF). Il apparaît que la puissance souscrite est donc supérieure de 17% à la puissance maximale atteinte.

Heures pleines Hiver	Heures creuses Hiver	Heures pleines Eté	Heures creuses Eté
36	36	46	46

Figure 5.3 : Puissances maximales atteintes dans les différentes tranches horo-saisonniers – MARSEILLE 1

En souscrivant un abonnement tarif jaune longues utilisations, on bénéficierait d'un effacement de puissance. Avec une puissance souscrite de 40kVA en hiver (10% de plus que le maximum atteint) et 50kVA en été (puissance supérieure de 8% à la valeur atteinte), on aurait une puissance réduite de 42kVA. Le coût de l'abonnement serait alors doublé mais en contre partie, le prix des kilowattheures serait plus avantageux, conduisant à une réduction de 6% (500€TTC) de la facture globale.

5.3 BATIMENT TOULON 1

Dans ce bâtiment, le coût de climatisation au mètre carré est très élevé, tout comme le montant de la facture d'électricité. La consommation de climatisation représente 17% du total (en kWh) et 16% du montant correspondant (en €TTC), dont 10% de consommation et 6% d'abonnement. Le coût d'abonnement a été estimé ainsi :

- On prend la valeur maximum de consommation du groupe froid observée, soit 4,631 kWh en 10 minutes ou 27,8kW (30/08/01, 16H10)
- On applique un facteur de puissance de 0,8 et on obtient donc une puissance réactive de 34,7 kVA
- Comme ce bâtiment possède un abonnement tarif jaune moyennes utilisations qui n'autorise aucun dénivelé de puissance et qu'il semble d'après l'examen des factures EDF que les puissances maximales soient atteintes durant l'été, on multiplie la puissance réactive par le prix d'abonnement du kVA (16,19€TTC).

Dans ce bâtiment, le compteur général EDF a été suivi et au même instant (30/08/01, 16H10), la puissance totale appelée est aussi maximum et vaut 43kW. Si on estime que le facteur de puissance moyen à l'échelle du bâtiment est aussi égal à 0,8, la climatisation est donc responsable de 65% du coût total d'abonnement.

Dans ce bâtiment, réduire les charges de climatisation permettrait de réduire à la fois le montant de l'abonnement et les coûts de consommation.

5.4 BATIMENT TOULON 2

Ce bâtiment est le seul à bénéficier d'un tarif vert. La consommation de climatisation représente, comme dans le bâtiment précédent, 10% de la consommation globale et le même pourcentage de la facture annuelle.

La puissance souscrite est de 65kW en heures de pointe et en heures pleines hiver, de 120kW en creuses hiver et en été, conduisant à une puissance réduite de 83,1kW. Le choix de ce dénivelé de puissance est étrange pour un immeuble de bureaux dont l'activité est nulle pendant la nuit. En outre il n'est pas justifié par l'examen des factures qui indique que la puissance maximale est atteinte en heures pleines au mois de mai ce qui s'explique peut-être par un appel de puissance très important lors de la mise en route de la climatisation.

Si on applique le dénivelé de puissance aux heures pleines d'été, c'est à dire que la puissance maximum est de 65kW en hiver (heures de pointes, pleines et creuses) et de 120kW en été (heures pleines et creuses), la puissance à souscrire est réduite de 10% , passant à 74,9kW et autorisant une économie annuelle de 140 €TTC.

5.5 CONCLUSION

Dans trois des quatre bâtiments étudiés, le poids de la climatisation est pratiquement égal, de l'ordre de 16% de la consommation annuelle. Le cas du quatrième bâtiment (Marseille 1) est un peu particulier. En effet, on ne suit le système de climatisation que d'un seul bâtiment alors que deux sont alimentés par le même compteur EDF. De plus, une partie du site est chauffée à l'électricité. Ces deux remarques expliquent que les consommations d'électricité liées à la climatisation ne représentent que 6% de la consommation totale.

Les coûts d'électricité afférents à la climatisation ne sont pas négligeables, s'élevant à environ 15% de la facture globale à Avignon et Toulon 1 et à 10% à Toulon 2. Cette constatation va à l'encontre de l'idée que la climatisation est un usage peu cher du fait du prix réduit du kilowattheure durant l'été. Cette idée ne tient pas compte de deux éléments :

- en tarif bleu, le prix du kilowattheure est le même en hiver et en été (à l'exception de l'option tempo)
- si la puissance maximale est atteinte durant l'été du fait de la climatisation, l'abonnement doit tenir compte de ce besoin. Ainsi dans le cas d'un tarif jaune moyennes utilisations, aucun dénivelé de puissance n'est possible. Cela peut, dans ce cas, être la puissance nécessaire en période de climatisation qui dimensionne la puissance à souscrire toute l'année.

Enfin, on a remarqué dans cette étude que les abonnements sont souvent mal choisis, étant dans certains cas surdimensionnés (près de 20% à Marseille 1) ou encore présentant des choix difficilement explicables de dénivelés de puissance (exemple : dénivelé en heures creuses hiver à Toulon 2 alors qu'aucun usage ne justifie ce choix).

6. MODES D'UTILISATION DE LA CLIMATISATION

Les possibilités d'interventions des utilisateurs sur les systèmes de climatisation varient fortement d'un bâtiment à l'autre. Dans les sites équipés de systèmes à détente directe, les occupants peuvent quand ils le désirent mettre en fonction le système de leur bureau et en programmer la température de consigne. Dans les systèmes centralisés observés, des horloges interdisent soit le fonctionnement du groupe frigorifique (Toulon 2), soit la mise en route des ventilo-convecteurs (Mouans Sartoux), soit des deux (Toulon 1).

6.1 SYSTEMES A DETENTE DIRECTE INDEPENDANTS PAR BUREAUX (SPLITS ET MULTISPLITS) - AVIGNON ET MARSEILLE 2

Un tiers de la consommation de climatisation a lieu la nuit et les week-ends, c'est à dire pendant des périodes de non occupation. On peut d'ores et déjà en conclure que ceux-ci sont à l'origine d'une surconsommation de 50% due au non-arrêt des appareils le soir et les WE. Comme tous les appareils sont laissés en libre usage, la figure 6.1 montre pour le bâtiment d'Avignon que la répartition est très différente d'un bureau à l'autre. Ainsi, 59% de la consommation de la salle de réunion et du bureau double correspondent à des périodes de non-occupation. En revanche, l'occupant du bureau STIR laisse très rarement son climatiseur en route en cas d'absence.

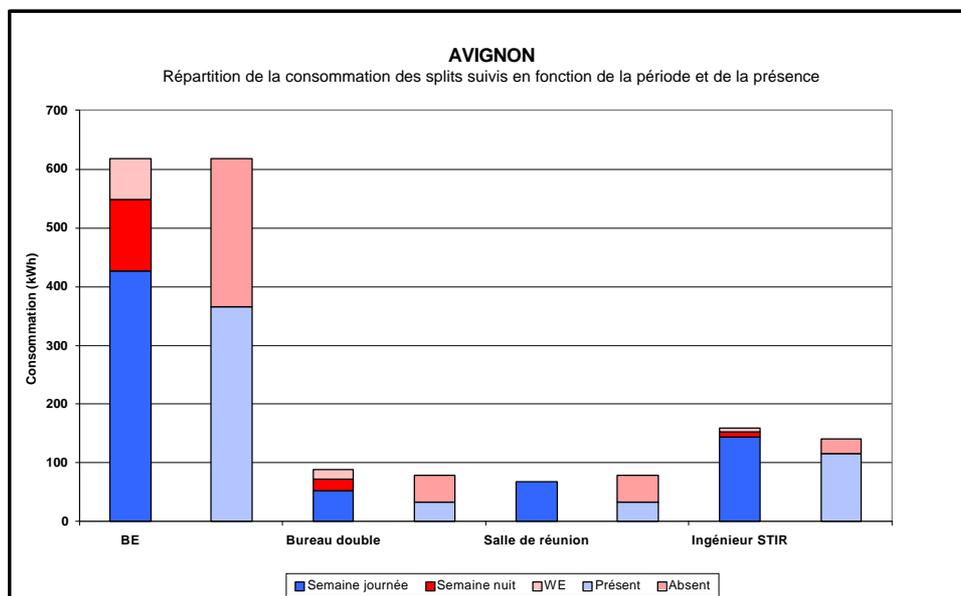


Figure 6.1 : Répartition de la consommation en fonction de la présence et de la période – AVIGNON

Il est par ailleurs notable que ces systèmes fonctionnent pour les deux bâtiments jusqu'à la fin de la période de mesure (16 octobre). Or il est tout à fait possible à un utilisateur de mettre en fonction son climatiseur à n'importe quel moment de l'année et en particulier pendant la période

de chauffe. Ceci constitue probablement un des défauts majeurs de cette installation pour laquelle la production de froid et chaud dans un même bureau est possible.

6.2 GROUPES FROID CENTRALISES ET VENTILO-CONVECTEURS A DETENTE DIRECTE.- MARSEILLE 1

Ni le groupe froid, ni les ventilo-convecteurs ne sont commandés par une horloge. Ainsi à cause du comportement des usagers, les ventilo-convecteurs fonctionnent plus de la moitié du temps alors que les bureaux ne sont pas occupés. Comme dans le cas du bâtiment d'Avignon, la répartition varie en fonction de l'utilisateur. Cependant les oublis sont beaucoup plus fréquents. Le cas extrême est celui d'un bureau où **71% de la consommation sert à refroidir une pièce vide**. Il semble que dans ce bâtiment et en particulier au deuxième étage, personne n'ait été sensibilisé à l'intérêt d'éteindre les climatiseurs en fin de journée. Il est remarquable que ces occupants n'éteignent généralement pas non plus leurs postes informatiques, ni les soirs, ni les week-ends.

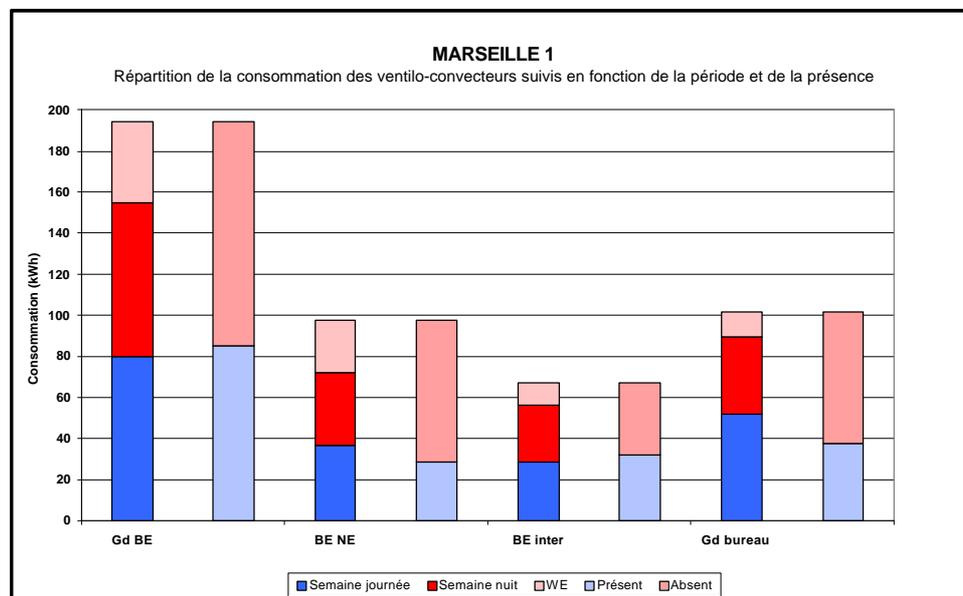


Figure 6.2 : Répartition de la consommation en fonction de la présence et de la période – MARSEILLE 1

Le groupe froid fonctionne jusqu'à la fin de la période de mesures (15 octobre). La consommation est faible en octobre mais non négligeable. Le groupe étant réversible, il n'est jamais éteint et assure l'hiver les besoins de chauffage.

6.3 GROUPE FROID CENTRALISE ET DISTRIBUTION D'EAU GLACEE

6.3.1 Bâtiment TOULON 1

La figure 6.3 donne le profil type de fonctionnement du groupe froid et des ventilo-convecteurs ainsi que la température intérieure moyenne observée dans ce bâtiment.

Le groupe froid et les ventilo-convecteurs sont commandés par deux horloges qui interdisent leur fonctionnement pendant une partie de la nuit et les week-ends.

Les ventilo-convecteurs se mettent en route dès 3H00 (0H00 le lundi) alors que le groupe froid ne marche qu'à compter de 7H00. La température intérieure ne diminue évidemment qu'à partir du moment où le groupe froid fonctionne. De même le soir, les ventilo-convecteurs s'arrêtent à 18H30 et le groupe froid n'est stoppé que vers 20H00. Ainsi pendant 1 heure 30, le groupe ne produit plus de froid (puisque'il n'y a plus de demande des ventilo-convecteurs) mais les auxiliaires qui lui sont associés continuent de fonctionner inutilement.

Il faut encore noter qu'à partir du 31 août, l'horloge régissant le fonctionnement des ventilo-convecteurs a été désactivée, conduisant à un fonctionnement et une consommation permanente de ces derniers.

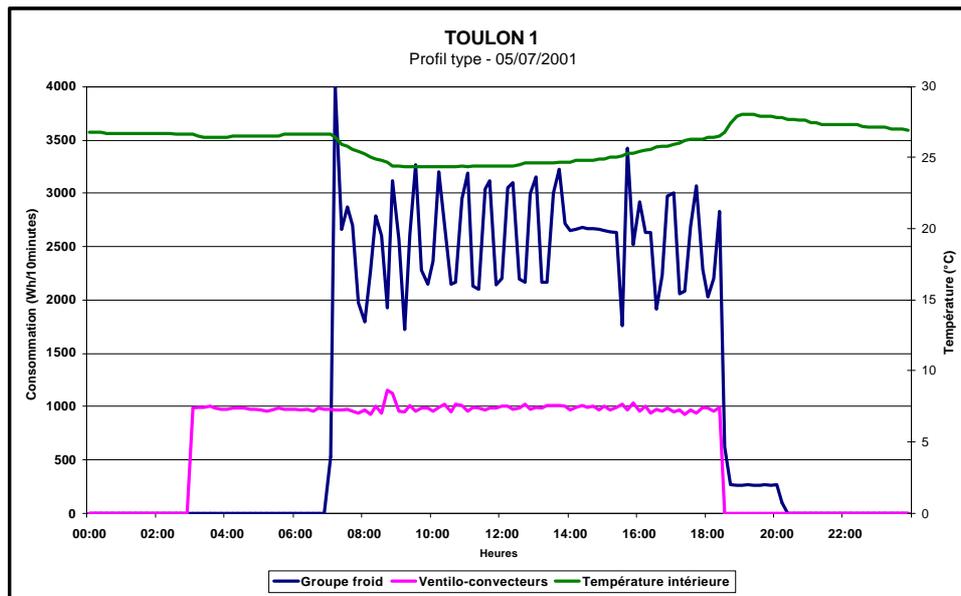


Figure 6.3 : Description du fonctionnement du groupe froid et des ventilo-convecteurs – TOULON 1

La programmation des horloges des ventilo-convecteurs s'explique par le fait qu'ils assurent également la distribution du chauffage. Compte tenu des difficultés rencontrées à chauffer le bâtiment, les périodes de soufflage sont étendues et ne sont pas modifiées en été. Il est remarquable que les responsables du bâtiment ignoraient la présence de l'horloge de programmation des horaires de fonctionnement des ventilo-convecteurs.

Le groupe froid est arrêté le 25 septembre de même que la pompe de circulation. Seul le fonctionnement des ventilo-convecteurs reste autorisé.

6.3.2 Bâtiment TOULON 2

La figure 6.4 présente le fonctionnement du groupe froid et de deux ventilo-convecteurs. Des horloges commandent le groupe froid, les pompes de circulation d'eau glacée et certains groupes de ventilo-convecteurs. Cependant, comme le montre la figure 6.5, des ventilo-convecteurs peuvent fonctionner en permanence. Ainsi on voit que même avec une horloge (cas de l'espace café) 65% de la consommation sert à climatiser la pièce quand elle est vide. Mais ce fait tient aussi à la nature du lieu suivi car s'il est occupé de façon intermittente il doit néanmoins être climatisé toute la journée.

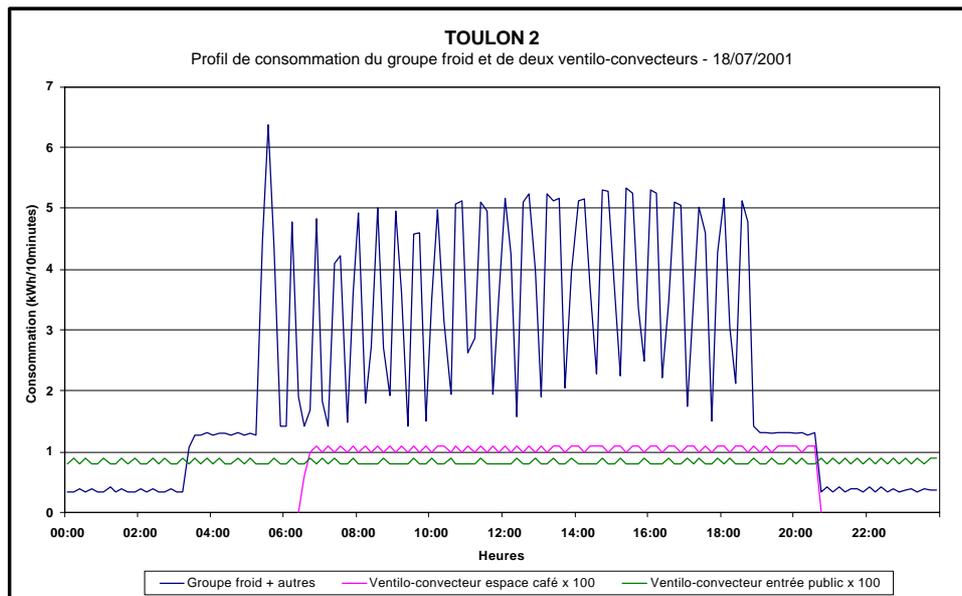


Figure 6.4 : Description du fonctionnement du groupe froid et de certains ventilo-convecteurs – TOULON 2

Il est notable que les ventilo-convecteurs des espaces communs à de nombreux utilisateurs sont fréquemment laissés en fonction car personne ne se sent responsable de leur arrêt ou ne sait si leur maintien en marche est encore nécessaire pour d'autres personnes.

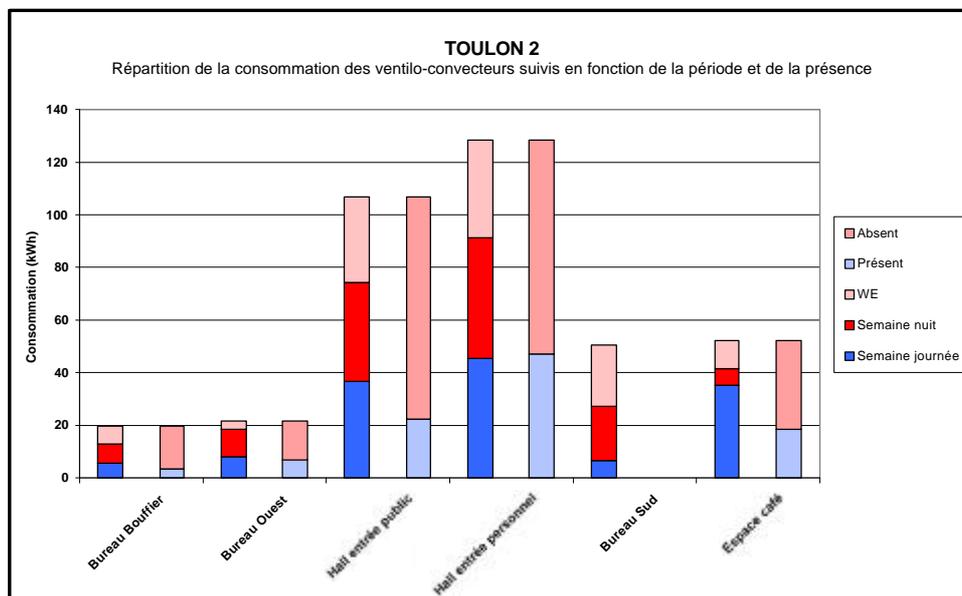


Figure 6.5 : Répartition de la consommation en fonction de la présence et de la période – TOULON 2

Le groupe froid est mis en position attente le 25 septembre. A partir de cette date, il ne produit plus de froid mais peut être remis en route très rapidement en cas de besoin. Dans cet état, la consommation journalière est d'environ 75 kWh/jour probablement en raison du maintien en chauffe des carters des compresseurs et des pompes de distribution. Il est totalement arrêté le 12 octobre pour passer en mode de chauffage.

6.3.3 Bâtiment MOUANS SARTOUX

Comme on le voit sur la figure 6.6, le fonctionnement des ventilo-convecteurs est commandé par une horloge à chaque étage du bâtiment. Les horaires programmés correspondent aux heures ouvrées, à l'exception de ceux du premier étage qui, du fait du mode d'occupation d'une partie de ces locaux, sont également autorisés durant les week-ends.

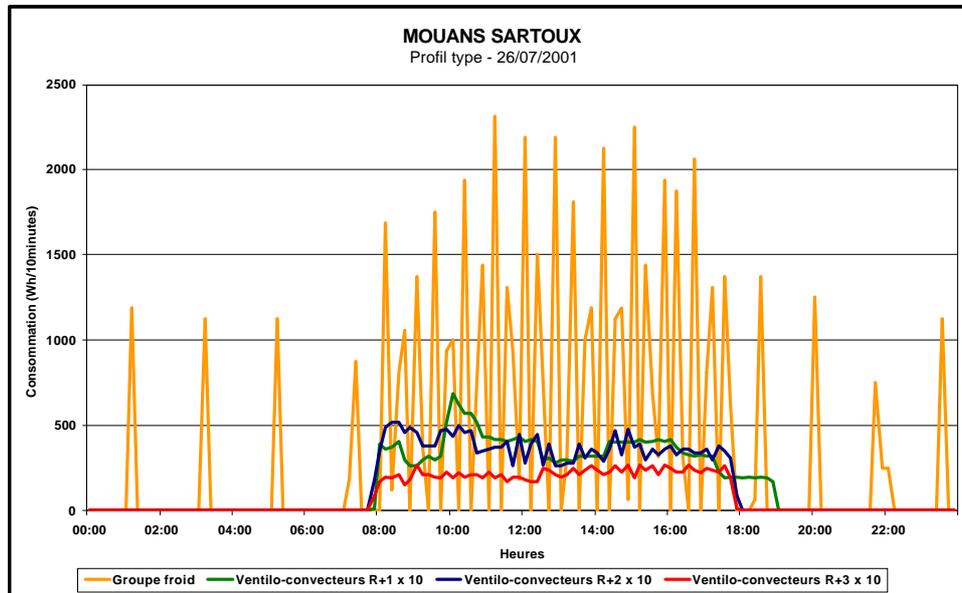


Figure 6.6 : Description du fonctionnement du groupe froid et des ventilo-convecteurs

A compter du 14 août, la programmation des ventilo-convecteurs du premier étage est désactivée, conduisant à un fonctionnement permanent de certains d'entre eux et à une consommation supplémentaire de 120 kWh sur la fin de la période de climatisation (soit 47% de la consommation totale de ce groupe de ventilo-convecteurs).

Le groupe froid est arrêté le 3 septembre.

6.3.4 Conclusion

Les graphiques 6.7 et 6.8 illustrent la ventilation des consommations des groupes frigorifiques et des ventilo-convecteurs en fonction de la période de fonctionnement : heures de bureau des jours ouvrés (du lundi au vendredi, de 7 heures à 19 heures), nuit, week-ends. Les consommations liées à la climatisation des locaux informatiques ne sont pas incluses pour les sites de Toulon 1 et 2.

La consommation de climatisation des deux sites équipés de systèmes splits (Avignon et Marseille 2) pourrait être réduite grâce à l'ajout d'horloges limitant le fonctionnement des climatiseurs, à l'exception de ceux des salles informatiques (ou d'autres pièces nécessitant une climatisation permanente), aux périodes d'occupation du bâtiment. En effet, environ un tiers de la consommation (27% à Avignon et 39% à Marseille 2) a lieu la nuit ou le week-end.

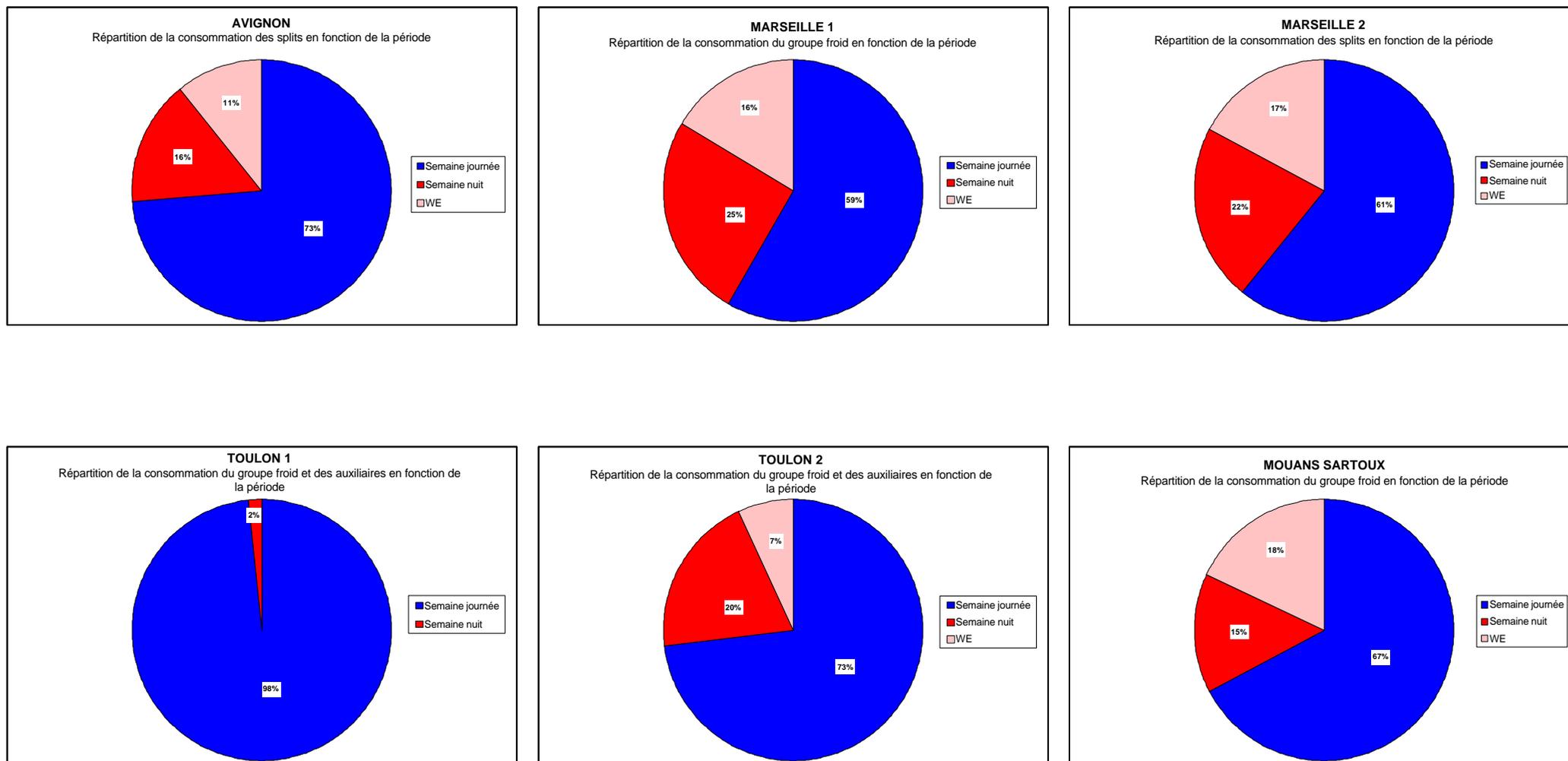


Figure 6.7 : Répartition de la consommation des groupes froid et des systèmes splits en fonction de la période

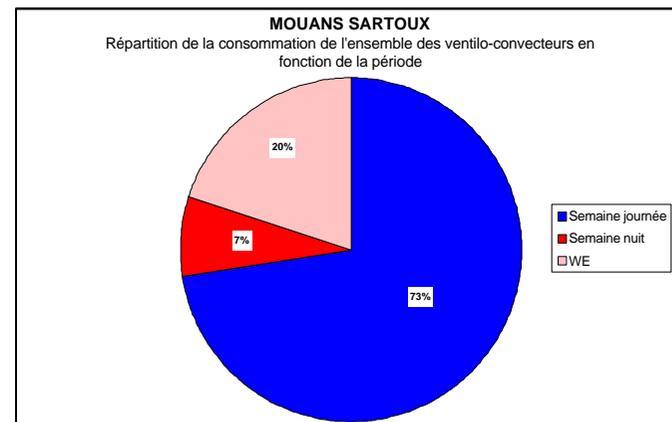
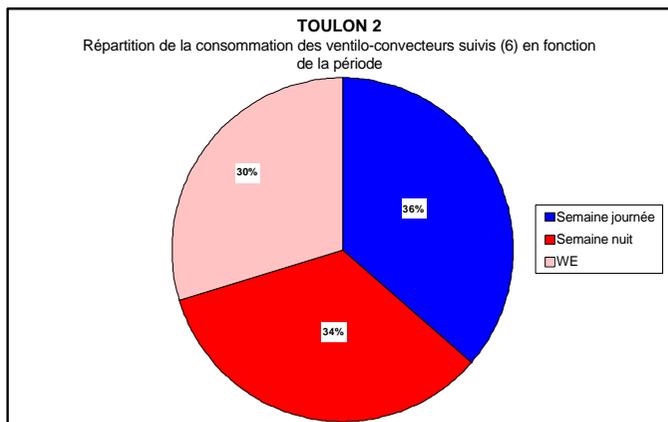
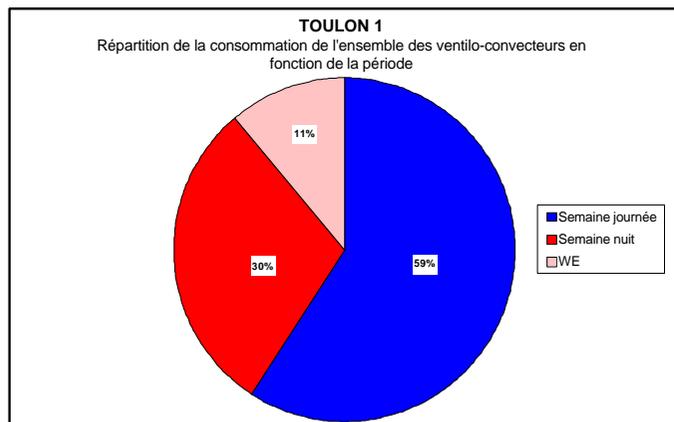
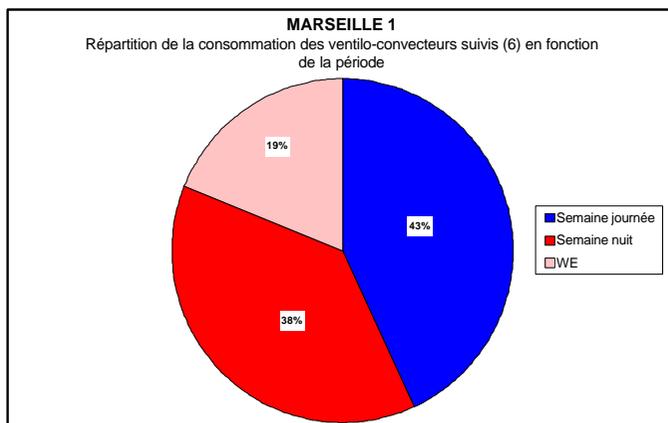


Figure 6.8 : Répartition de la consommation des ventilo-convecteurs en fonction de la période

La répartition de la consommation varie d'un site à l'autre pour les quatre bâtiments équipés de systèmes centralisés :

- à Marseille 1 on ne trouve aucune horloge ce qui conduit à ce que 41% de la consommation totale de groupe froid et 57% de celle des ventilo-convecteurs aient lieu alors que le bâtiment n'est pas occupé.
- A Mouans Sartoux, seuls les ventilo-convecteurs sont commandés par horloge, limitant ainsi la surconsommation due au fonctionnement la nuit et les week-ends. Il paraît cependant nécessaire d'arrêter le groupe froid en même temps que les ventilo-convecteurs. Cela devrait permettre de réduire la part de consommation correspondant aux périodes de non occupation qui s'élève actuellement à 33%.
- A Toulon 2, le groupe froid est arrêté pendant la nuit mais les auxiliaires telle la pompe de circulation continuent à fonctionner. De plus seule une partie des ventilo-convecteurs est commandée par une horloge. De ce fait, plus des deux tiers de l'énergie consommée par ceux-ci l'est durant les nuits et les week-ends.
- Toulon 1 est le seul site où le groupe froid et les ventilo-convecteurs sont contrôlés par horloge. Le groupe froid fonctionne seulement pendant les heures d'occupation. Par contre, la consommation des ventilo-convecteurs hors période d'occupation est de l'ordre de 40% car ils sont mis en route très tôt le matin et l'horloge a été désactivée en fin de période de climatisation conduisant à leur fonctionnement permanent.

Un contrôle des périodes de fonctionnement corrélées aux heures d'occupation devrait donc systématiquement être mis en place à la fois sur les groupes froid, les auxiliaires et les ventilo-convecteurs (ou sur les systèmes splits). L'ensemble des équipements doit de plus fonctionner simultanément. Il est en effet inutile, par exemple, de laisser en route le groupe froid si les ventilo-convecteurs sont arrêtés.

7. ANALYSE DES CHARGES DE CLIMATISATION

7.1 METHODE EMPLOYEE

L'identification et la quantification de l'impact des principaux paramètres influant les consommations de climatisation sont nécessaires si l'on veut préconiser de façon pertinente les solutions de maîtrise de l'énergie.

Les apports de chaleur dans les bâtiments climatisés peuvent être séparés en apports internes et externes. Les premiers comprennent les apports par les personnes (sous forme de chaleur sensible et latente) et les consommations électriques des appareils présents dans les bâtiments dont une partie de l'énergie est transmise à l'ambiance du lieu. Les apports externes proviennent de la différence d'enthalpie (température et humidité) entre l'air extérieur et l'air intérieur, se traduisant par un flux d'énergie par les parois et par renouvellement d'air. Enfin, l'ensoleillement conduit à un apport de chaleur direct par les vitrages et indirect par les parois opaques.

Afin d'évaluer les contributions de chacun de ces postes, une modélisation simplifiée des bâtiments, décrite par la figure 7.1, a été réalisée au moyen d'un pas de temps de 10 minutes, en utilisant notamment les mesures de température extérieure, d'ensoleillement, de renouvellement d'air et d'apports internes électriques.

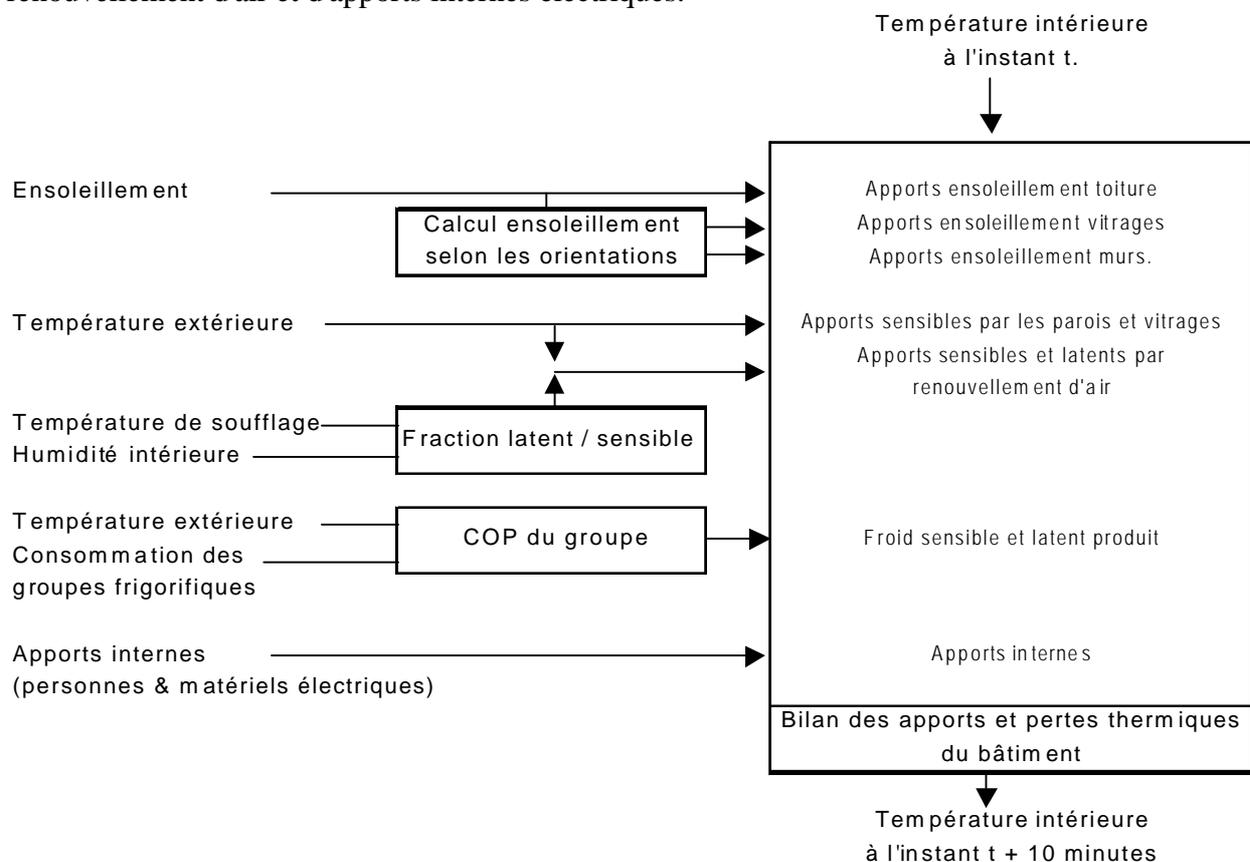


Figure 7.1 : Modèle simplifié retenu pour l'évaluation des charges de climatisation.

L'ensoleillement, mesuré dans le plan horizontal permet le calcul 10 minutes par 10 minutes de l'énergie solaire incidente dans tous les plans. Pour les vitrages, les caractéristiques de transmission énergétique ont été utilisées en fonction de l'angle d'incidence des rayons. Les masques proches (casquettes, recul du tableau de la fenêtre par rapport à la façade...) ont été pris en compte de même que les ombres lointaines (autres bâtiments...). Des coefficients d'absorption variant selon la nature et la couleur des parois ont permis de calculer les apports solaires par les murs et toitures. L'écart entre la température extérieure et la température intérieure moyenne du bâtiment déterminent les autres apports par les parois ainsi que les apports de chaleur sensible par renouvellement d'air.

La quantité de froid produite est le résultat du produit de la consommation des groupes de froid seuls (hors auxiliaires) par leur COP (linéarisé en fonction de la température extérieure). Le rapport R entre l'énergie frigorifique servant à la déshumidification et l'énergie frigorifique totale est évaluée grâce aux températures de soufflage et aux températures et humidités intérieures. Le bilan effectué au niveau de la batterie froide des ventilo-convecteur montre que:

$$R = \frac{0.69 * (W_{\text{intérieure}} - W_{\text{soufflage}})}{0.34 * (T^{\circ}_{\text{intérieure}} - T^{\circ}_{\text{soufflage}}) + 0.69 * (W_{\text{intérieure}} - W_{\text{soufflage}})}$$

Ce rapport permet de connaître la quantité totale de condensats produits et a été recalé sur les mesures effectuées. Les apports latents par renouvellement d'air s'obtiennent par différence entre l'énergie des condensats et les apports internes d'humidité.

AVIGNON - Mois d'août 2001

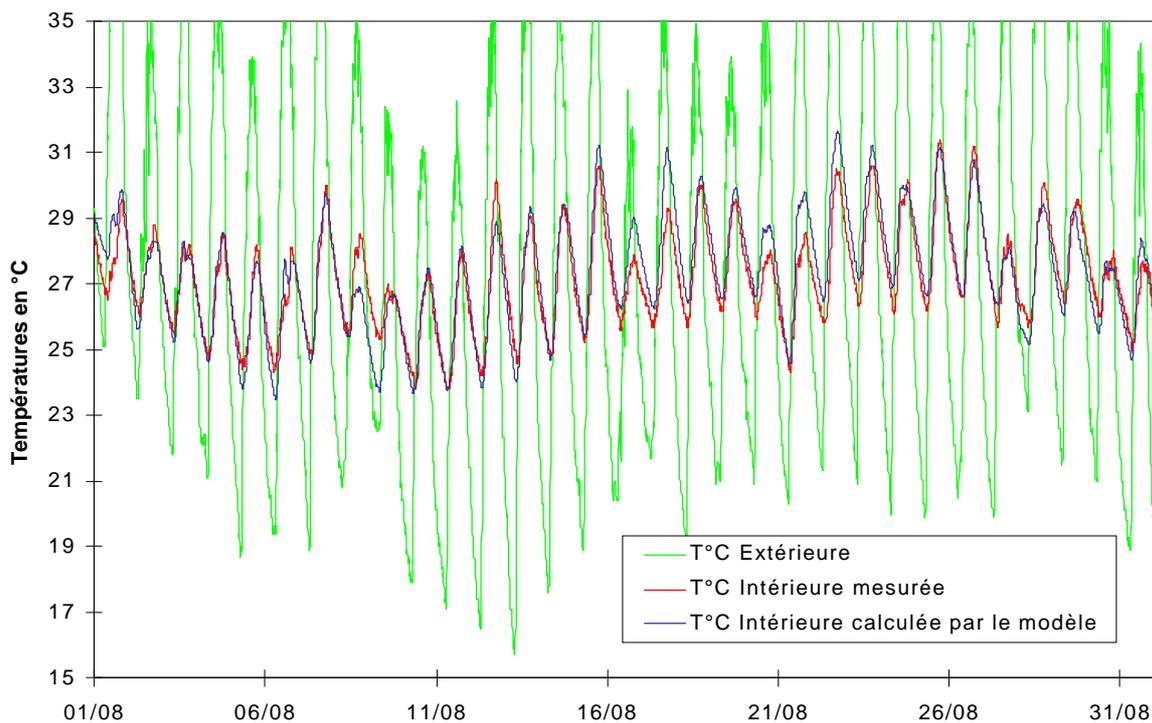


Figure 7.2 : Comparaison de la température intérieure mesurée et de la valeur obtenue grâce au modèle – août 2001, AVIGNON

Ainsi, il a été possible d'ajuster les paramètres des bâtiments (coefficients d'absorption...) afin de retrouver avec le modèle les températures intérieures mesurées effectivement. Les

principales difficultés d'une telle modélisation sont liées au renouvellement d'air par des portes et fenêtres ouvertes, à l'influence du vent ou encore à la fréquentation de bâtiments accueillant du public. La prise en compte des phénomènes inertiels et du comportement thermique des structures internes est également très limité. L'approche et les résultats qui suivent doivent donc être pris avec une certaine précaution. Rien ne peut en effet remplacer une modélisation lourde, même si celle-ci possède aussi de nombreuses limites en ce qui concerne les échanges superficiels et les apports humains.

7.2 RESULTATS

Les graphiques donnés figure 7.3 présentent les résultats de l'évaluation des contributions des différentes charges de climatisation pour les six bâtiments étudiés. Les apports ont été regroupés en 7 postes :

- Apports internes (apports par les personnes sous forme sensible et latente et apports de chaleur par les matériels électriques)
- Ensoleillement toiture : transfert de chaleur dû à l'exposition solaire du toit du bâtiment.
- Ensoleillement parois opaques : Flux lié à l'augmentation de température des murs exposés à l'ensoleillement.
- Ensoleillement parois vitrées : Apport solaires dans le bâtiment au travers des vitrages.
- Transfert parois opaques : Flux de chaleur par les murs dû à l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur.
- Transfert vitrages : Flux de chaleur par les vitrages dû à l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur.
- Renouvellement d'air : Apport d'énergie par l'air admis dans le bâtiment sous forme de chaleur sensible et latente. Ce flux est proportionnel au débit masse de renouvellement d'air multiplié par l'écart d'enthalpie entre l'air extérieur et l'intérieur.

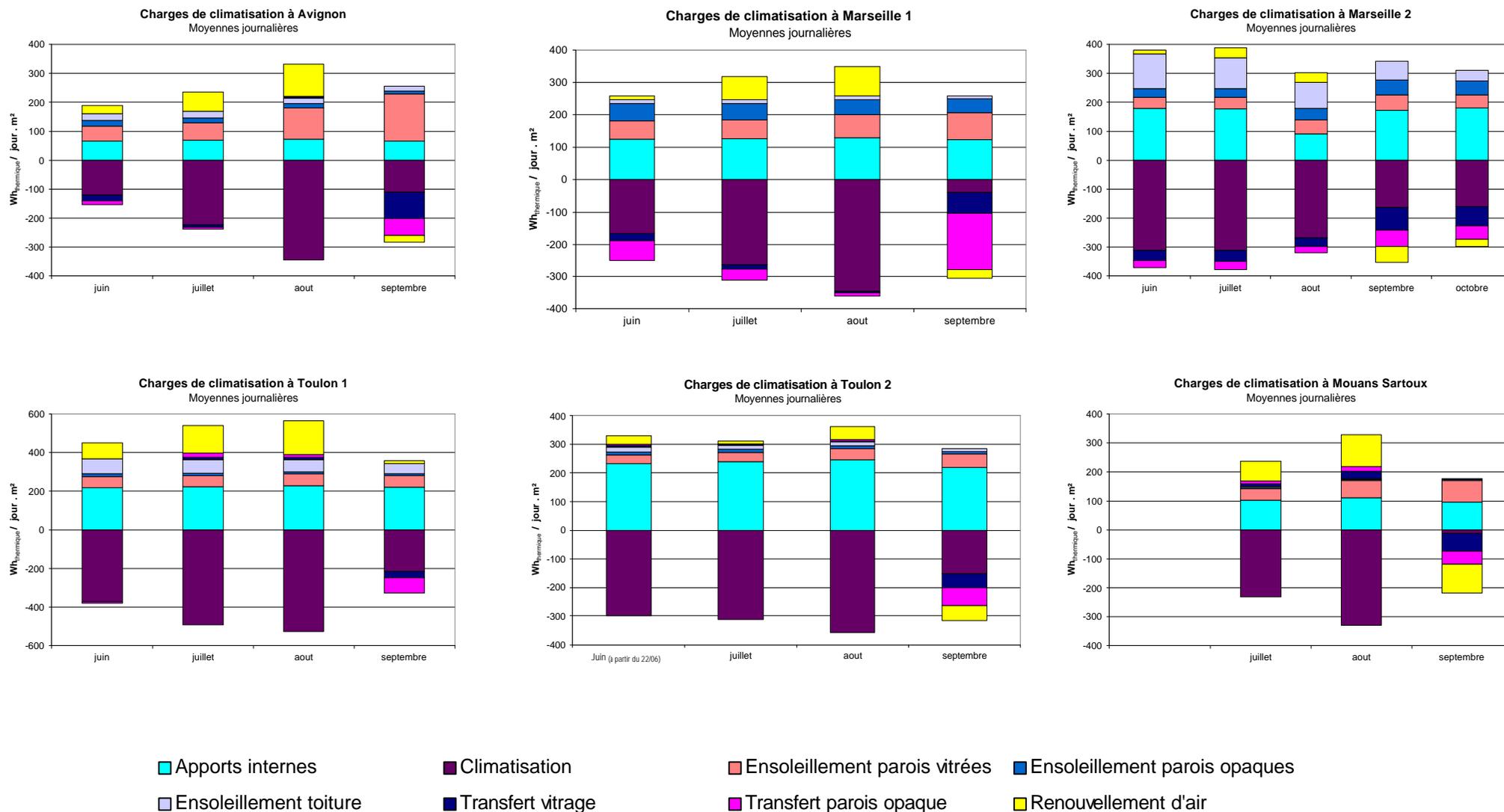


Figure 7.3 : Evaluation des différentes charges de climatisation

7.2.1 AVIGNON

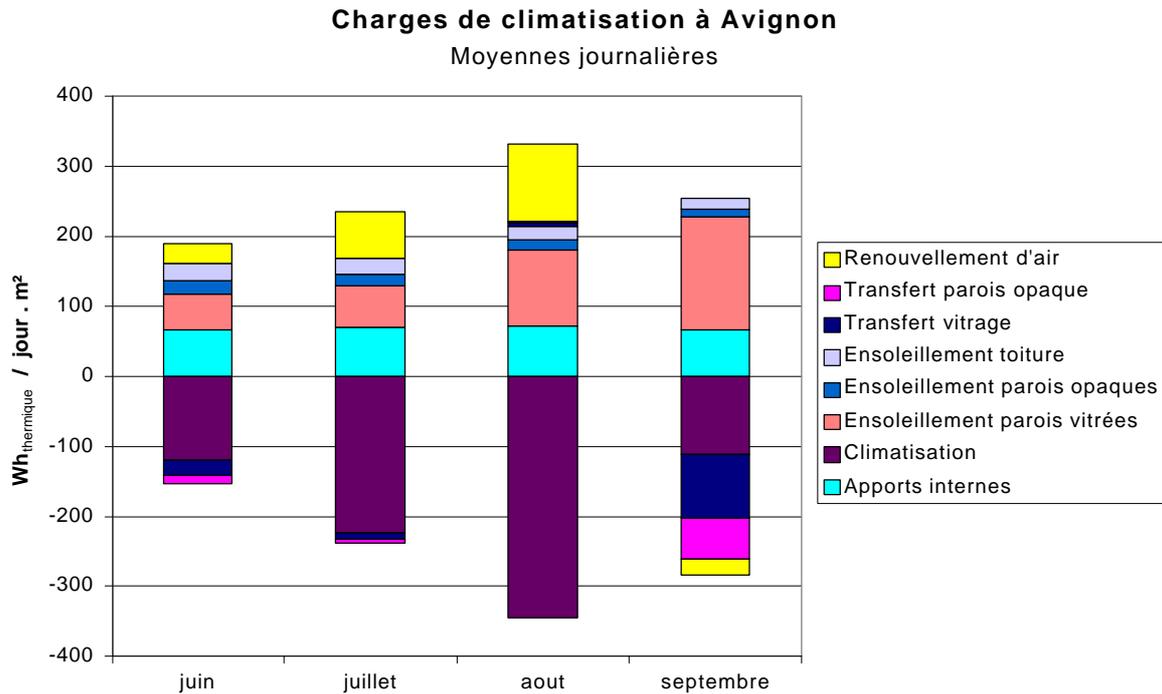


Figure 7.4 : Evaluation des charges de climatisation - AVIGNON

Les apports internes sont les plus faibles des 6 sites étudiés avec environ 70 Wh/jour/m² de façon sensiblement constante de juin à septembre. Ces charges se divisent en plusieurs postes dont le principal est lié aux apports électriques permanents (serveurs informatiques, onduleurs, photocopieuses...). Les charges dues par les occupants arrivent en second et sont légèrement inférieures. Enfin, les postes informatiques et l'éclairage qui, comme le montre la figure 7.5 est très peu utilisé, constituent le solde des apports.

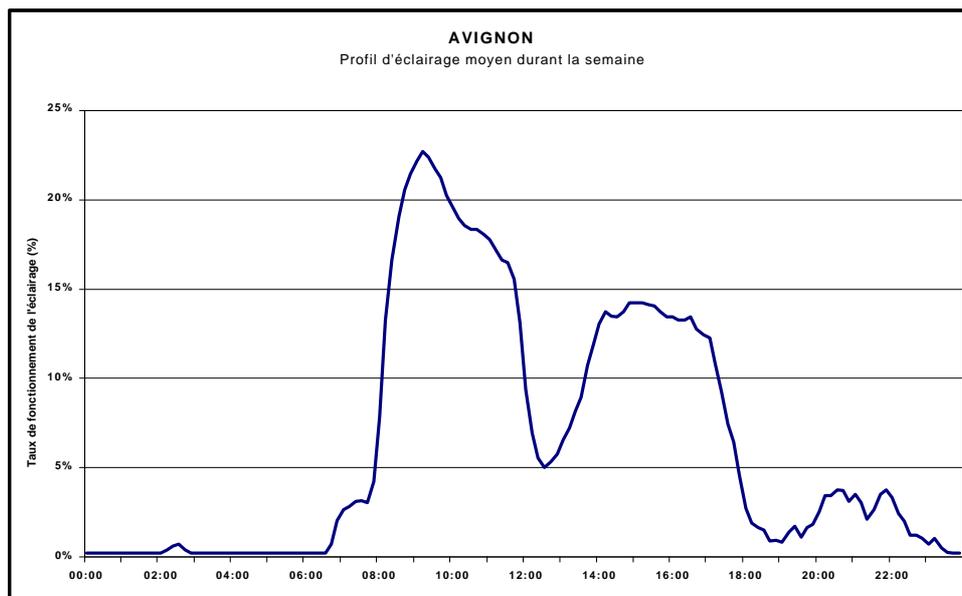


Figure 7.5 : Profil moyen d'éclairage au cours de la semaine - AVIGNON

Le faible nombre d'occupants, l'éclairage naturel important et le taux d'équipement informatique, modéré et généralement éteint en cas de non utilisation (figure 7.6), expliquent la contribution relativement modeste des apports internes au bilan thermique.

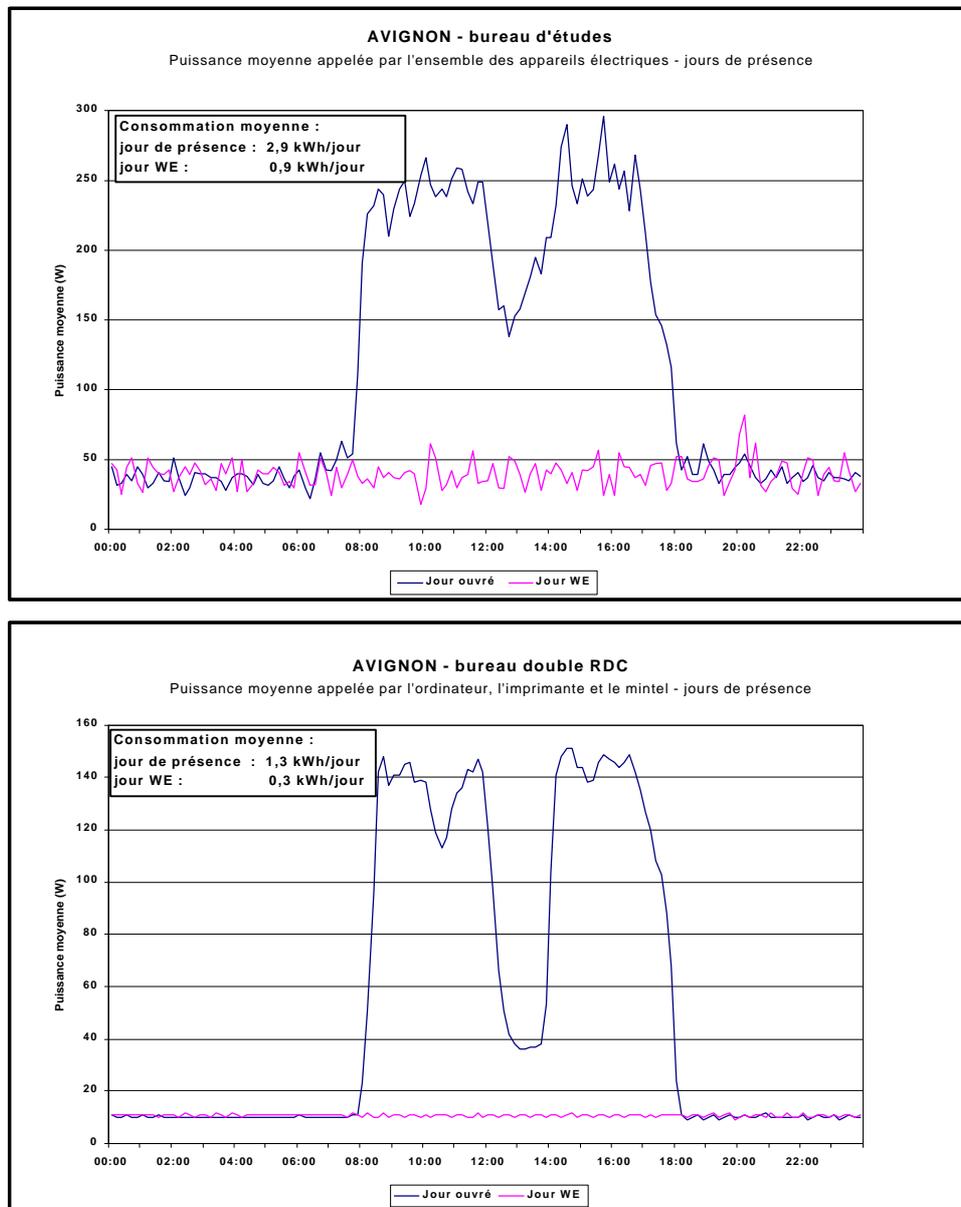


Figure 7.6 : Profil de fonctionnement de divers matériels informatiques – AVIGNON

L'insolation des vitrages constitue le poste majeur d'apport de chaleur du site en dépit de la présence de casquettes et de masques denses. Le taux de vitrage du bâtiment est très fort, la façade sud étant en totalité vitrée. La salle de réunion donnant sur l'est est aussi très vitrée. Il n'y a pas de protection solaire extérieure et les stores intérieurs sombres ne suppriment pas les apports. Les températures atteintes rendent cette salle de réunion presque inutilisable en été dans la journée malgré l'unité de climatisation dont elle est équipée. En juillet et août, la température (sans climatisation) y dépasse 27°C dès 8h du matin ! La durée cumulée de présence dans cette salle est inférieure à 3 heures sur ces deux mois.

Enfin, le renouvellement d'air observé dans le bâtiment est considérable et constitue la charge principale en juillet et août du fait que la porte d'entrée du bâtiment, située au nord, est maintenue ouverte de manière très fréquente. Un courant d'air est obtenu en ouvrant une ou plusieurs fenêtres de bureaux au rez de chaussée en façade sud. Les portes des bureaux restent en très grande majorité ouvertes, il y a donc souvent cohabitation entre les personnes utilisant la climatisation (principalement au premier étage, bien plus chaud) et d'autres utilisant la ventilation naturelle. Les portes et fenêtres ne sont maintenues fermées que lors des jours les plus chauds et alors, la quasi totalité des bureaux utilise la climatisation.

Les consommations durant l'été restent toutefois limitées du fait que seule une partie des occupants utilise la climatisation et veille à l'arrêter en partant. En outre, les températures intérieures atteintes, d'environ 27°C, conduisent à des échanges moyens journaliers de chaleur par les parois dirigés de l'intérieur vers l'extérieur. Enfin, le sous dimensionnement des climatiseurs qui se traduit par un fonctionnement presque permanent des groupes activés et une température de consigne de climatisation bien inférieures à la température atteinte limite le montant des consommations.

Seul un petit local informatique est climatisé en permanence. La température de consigne a été fixée à 27°C jusqu'au 6/08/2001 puis a évolué autour de 25°C. Malgré les apports internes constants et importants (environ 600 à 800 Watts de matériel informatique), l'unité atteint la consigne fixée. Le groupe de froid de ce climatiseur n'a pas fait l'objet d'une mesure de consommation électrique séparée cependant, la connaissance des charges du local nous permet d'estimer sa part entre un quart et un tiers de la charge de climatisation du bâtiment.

7.2.2 MARSEILLE 1

Les apports internes dans ce bâtiment atteignent 125 Wh/m²/jour.

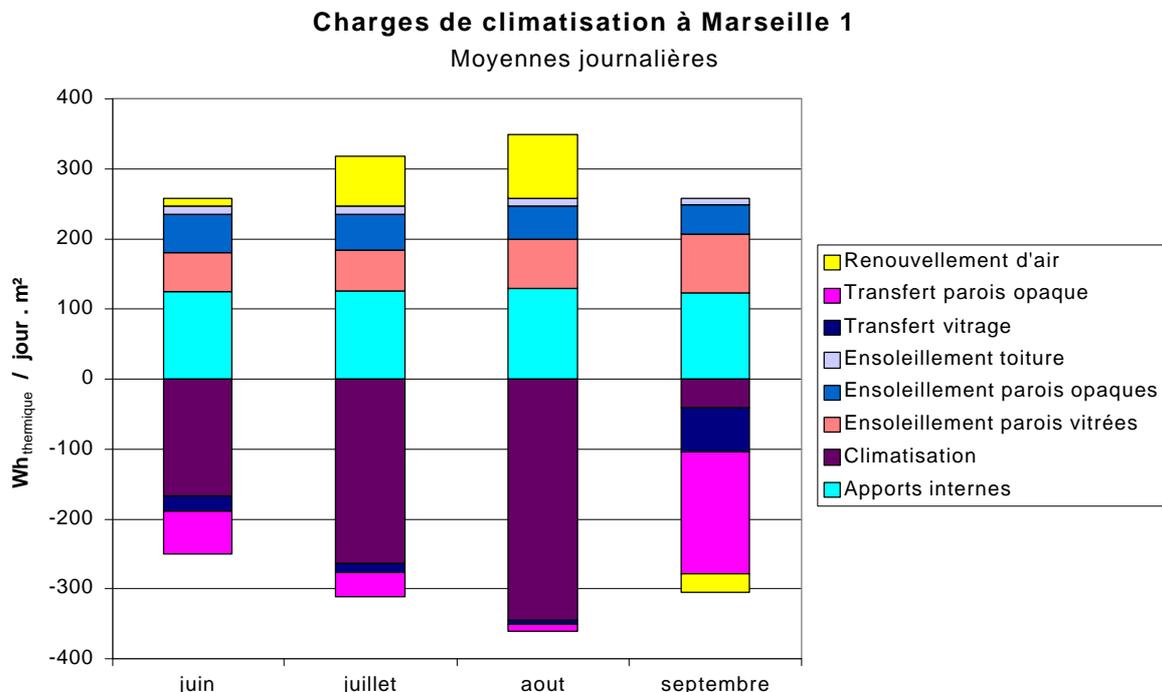


Figure 7.7 : Evaluation des charges de climatisation – MARSEILLE 1

Le taux d'équipement en matériel informatique est faible mais la plupart des appareils restent, comme le montre la figure 7.8, en fonction nuit et jour, de même que les ventilo-convecteurs des climatiseurs, en particulier au 2ème étage.

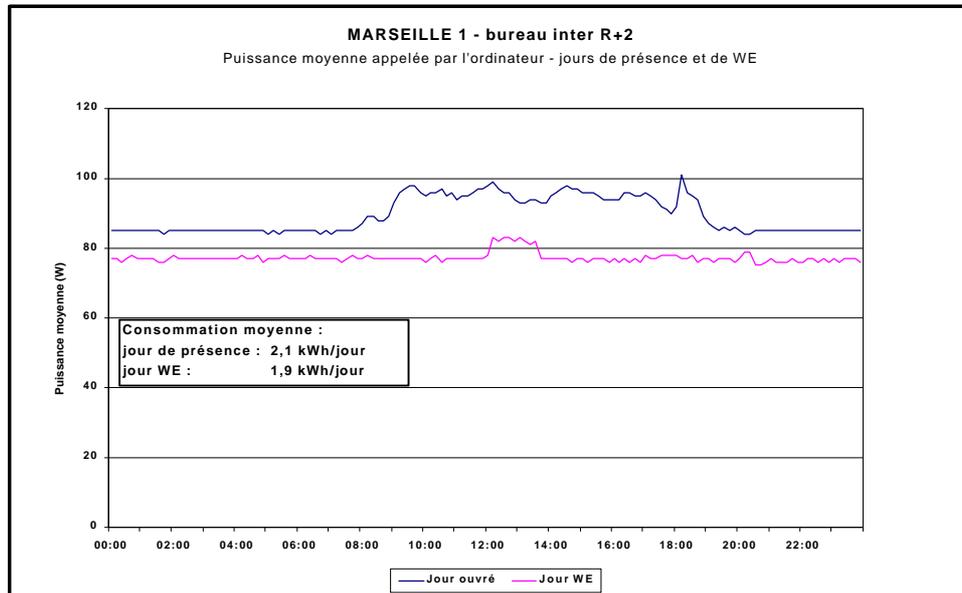


Figure 7.8 : Profil de fonctionnement d'un poste informatique – MARSEILLE 1

Les éclairages sont utilisés pendant des durées importantes en raison de la faiblesse des apports naturels (brise soleil) et des besoins de lumière important (dessin industriel). Enfin, les occupants sont assez nombreux et représentent un quart des apports internes.

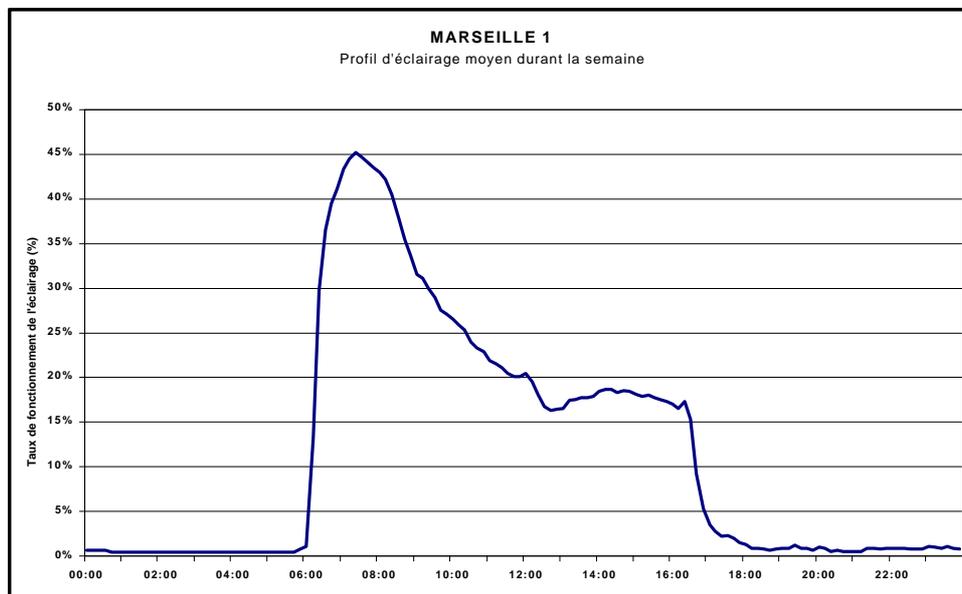


Figure 7.9 : Profil moyen d'éclairage au cours de la semaine – MARSEILLE 1

Les murs du bâtiment ne sont pas isolés et l'insolation transmise est évaluée à 50 Wh/m²/jour. Cependant, compte tenu de l'épaisseur des murs, le déphasage de plusieurs heures entre l'ensoleillement et l'apport de chaleur vers l'intérieur minimise l'impact de ce poste sur le

confort des occupants qui quittent le bâtiment généralement avant 17 heures. Les apports par les grands vitrages ouest non protégés de la salle du premier étage se produisent également plutôt en fin d'après midi lorsque le bâtiment n'est plus occupé.

Il convient toutefois de noter que, comme les climatiseurs restent le plus souvent en fonctionnement permanent (2ème étage notamment), ces apports de chaleur accroissent les consommations de climatisation et ce, à un moment où les performances des systèmes de froid sont amoindries par une température extérieure élevée (diminution du COP).

Les occupants du rez-de-chaussée utilisent rarement la climatisation, de toute façon peu nécessaire dans cette partie du bâtiment dont le côté ouest est enterré. Une bonne gestion des fenêtres le matin (le personnel travaille dès 7h30) permet de maintenir des températures acceptables grâce à la forte inertie du bâti. Ceci est d'autant plus satisfaisant que plusieurs personnes sur ce site n'apprécient pas la climatisation pour des raisons liées, selon elles, aux poussières véhiculées par les ventilo-convecteurs.

Par ailleurs, il a été observé que des radiateurs électriques restent sous tension durant la période de climatisation et sont allumés. Ils peuvent donc fonctionner dès lors que la température de la pièce descend au dessous de la consigne du thermostat ce qui se produit très probablement au moins pour les radiateurs des sanitaires, très ventilés, lors de nuits fraîches.

En outre, un système de ventilation mécanique centralisé à double flux est installé dans le bâtiment. Cependant, son alimentation électrique est, pour une raison inconnue, raccordée sur le ventilo-convecteur de la salle du premier étage du bâtiment. Cette salle étant peu utilisée, l'été notamment, la ventilation ne fonctionne donc presque pas.

7.2.3 MARSEILLE 2

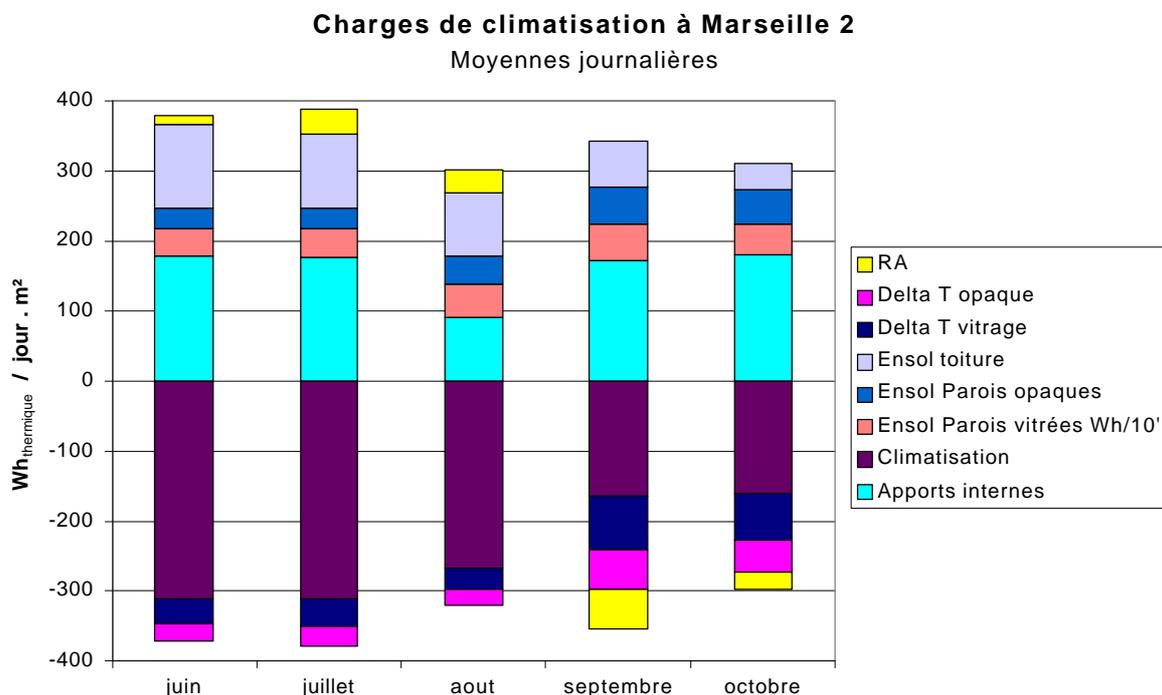


Figure 7.10 : Evaluation des charges de climatisation – MARSEILLE 2

Les apports internes atteignent 170 Wh/m²/jour, soit plus du double de ceux d'Avignon, hormis en août du fait des congés. Les apports par les personnes représentent moins de 20% de ce poste. L'essentiel est dû au fort équipement en matériel informatique, serveurs, photocopieuses, distributeurs de boissons ainsi qu'aux éclairages. Les bureaux de l'étage

supérieur sont éclairés en permanence du matin au soir car il n'y a qu'un seul interrupteur pour l'ensemble.

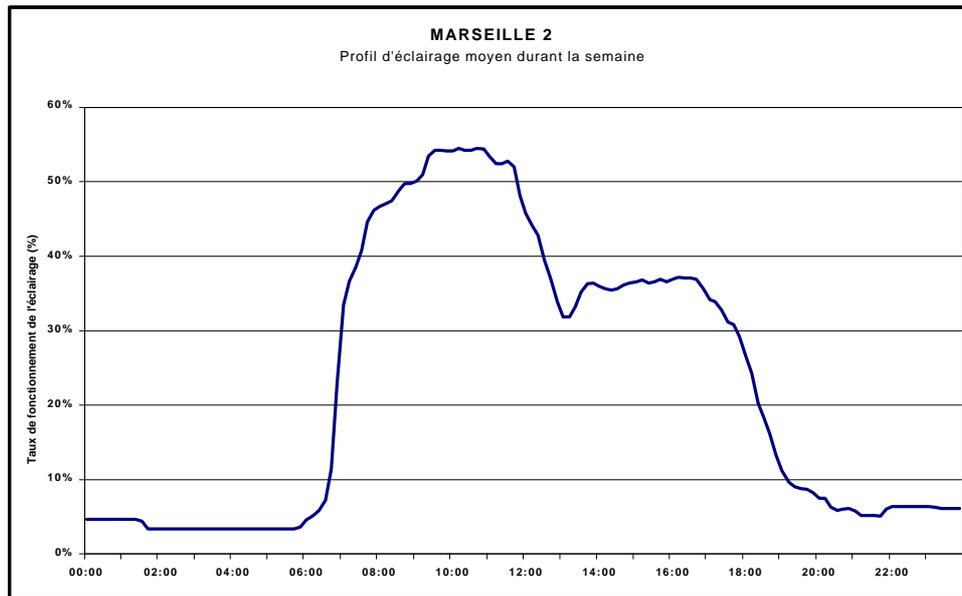


Figure 7.11 : Profil moyen d'éclairage au cours de la semaine – MARSEILLE 2

La photocopieuse principale, allumée en permanence, représente à elle seule une consommation d'environ 6 kWh par jour. Un local informatique renferme les baies de serveurs réseau informatique et téléphonique, onduleurs, imprimantes... Il est équipé d'un split fonctionnant en permanence. A noter qu'une des baies est elle même déjà climatisée, la chaleur étant rejetée dans le local informatique.

La toiture n'étant pas isolée et revêtue d'une étanchéité sombre, elle représente un apport de chaleur moyen de près de 100 Wh/m²/jour durant la période de climatisation. Elle peut en outre entraîner un effet de paroi chaude inconfortable pour les occupants. Les volets roulants sont très utilisés par les occupants pour diminuer les apports par les vitrages. Ils sont aussi systématiquement fermés les soirs et week-ends.

Les consommations spécifiques de climatisation sont donc importantes et l'écart obtenu entre les températures intérieures et extérieures reste très limité attestant d'un fonctionnement insuffisant de la climatisation. Celle ci est d'ailleurs encore utilisée de façon significative au mois d'octobre.

Les portes des bureaux sont souvent fermées ce qui fait qu'il y a peu de conflit entre des personnes utilisant la climatisation et les rares occupants préférant ouvrir les fenêtres (compte tenu des apports, il est difficile de garder un confort acceptable de cette façon sur ce site). La porte d'entrée du bâtiment est ouverte en tout début de journée mais rapidement refermée. C'est pourquoi les apports par renouvellement d'air sont faibles et les humidités intérieures nettement inférieures à l'humidité extérieure. L'effet de déshumidification des climatiseurs est d'autant plus marqué que les températures intérieures étant élevées, bien supérieures aux consignes, la régulation force des températures de soufflage d'air très basses qui entraîne de forts taux de déshumidification. Le confort dans ce bâtiment est atteint grâce à cette humidité absolue relativement basse et maintenue à des valeurs comprises généralement entre 10 et 11 grammes d'eau par kilogramme d'air sec.

7.2.4 TOULON 1

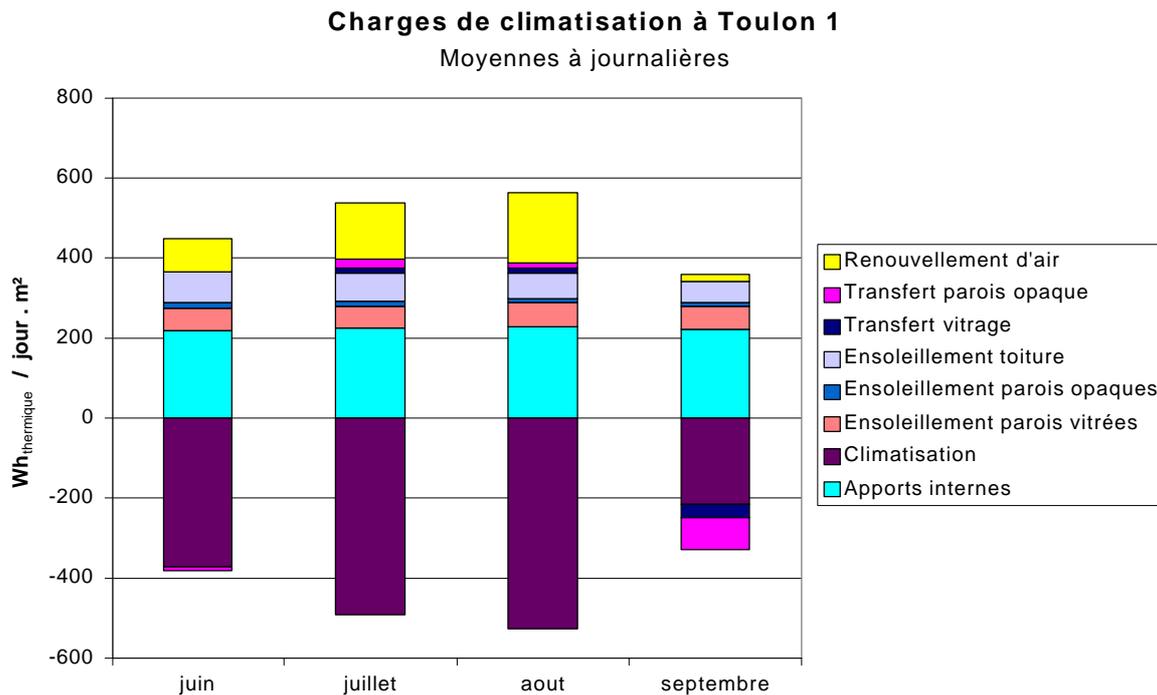


Figure 7.12 : Evaluation des charges de climatisation – TOULON 1

Ce bâtiment accueille un public nombreux. Les apports internes sont très importants, s'élevant à 220 Wh/m²/jour dont plus de 25% liés aux occupants (environ 35 personnes en moyenne pendant 8 heures par jour). Les consommations électriques permanentes sont également très élevées et une moyenne de plus de 100 Wh/m²/jour sont absorbés hors présence (nuits et week-end). La puissance moyenne consommée par le site durant ces périodes de non occupation atteint 5.7 kW dont :

1. 1.9 kW : climatisation local informatique.
2. 1 kW : photocopieuses et matériel bureautique en veille ou allumé, borne interactive.
3. 1.2 kW : serveurs réseaux informatique et téléphone, onduleur
4. 1.6 kW : autres veilles.

Le fonctionnement du groupe de climatisation du local informatique est continu sur toute la période de mesure à l'exception de deux arrêts d'une nuit. La température du local est basse avec une moyenne de 20 à 21°C mais la consigne (17 à 18°C) n'est pas atteinte ce qui explique que le compresseur ne s'arrête jamais. La puissance consommée croît avec la température extérieure, ce qui est normal pour un groupe de climatisation, mais reste inférieure aux données constructeurs de plus de 20%.

L'explication de ce mode de fonctionnement tient très vraisemblablement à un défaut du groupe tel qu'un sous remplissage en fluide. Un groupe en bon état, avec un COP supérieur à 3 pourrait absorber une puissance thermique de près 6 kW et parvenir sans peine à compenser les apports des machines et à atteindre la consigne de température du local, même très basse.

En tout état de cause, la consommation moyenne électrique de ce groupe durant la période étudié a atteint 52.2 kWh par jour ! (non incluse dans le comptage mis en place par l'ARENE)

Les apports par renouvellement d'air du bâtiment sont considérables, jusque 170 Wh/m²/jour au mois d'août. Ceci s'explique avant tout par le maintien de portes ouvertes au public au rez de chaussée (file d'attente systématique se prolongeant au dehors du bâtiment). Les portes sont

également ouvertes la plupart du temps sur l'ensemble de l'horaire d'accueil. Le site étant situé à quelques mètres seulement de la mer, les apports d'humidité sont très importants. Les volumes de condensats moyens mesurés atteignent près de 3 litres par jour et par ventilo-convecteur pour le mois d'août et sont à l'origine de plus de 35% de la consommation des climatiseurs.

Enfin, la toiture n'est pas isolée et représente une forte surface exposée rapportée à la surface utile intérieure du bâtiment. Les apports moyens par cette paroi atteignent une moyenne de 70 Wh/m²/jour sur la période de climatisation.

Les surfaces vitrées sont importantes, peu protégées et réparties dans toutes les directions. Leur hauteur relativement faible diminue sensiblement les apports au début de l'été et l'utilisation des volets roulants les week-ends diminue leur contribution moyenne. Cependant, ce poste paraît faible essentiellement parce que les autres postes sont très élevés.

Les températures moyennes intérieures obtenues sont confortables, entre 23 et 24°C en moyenne mais cachent une forte disparité entre le rez de chaussée plus froid et l'étage supérieur, dont la température est bien plus élevée car l'essentiel des apports internes et solaires s'y concentrent. Les occupants se plaignent d'inconfort durant les journées les plus chaudes et des ventilo-convecteurs supplémentaires ont été ajoutés dans les couloirs, en septembre 2001.

7.2.5 TOULON 2

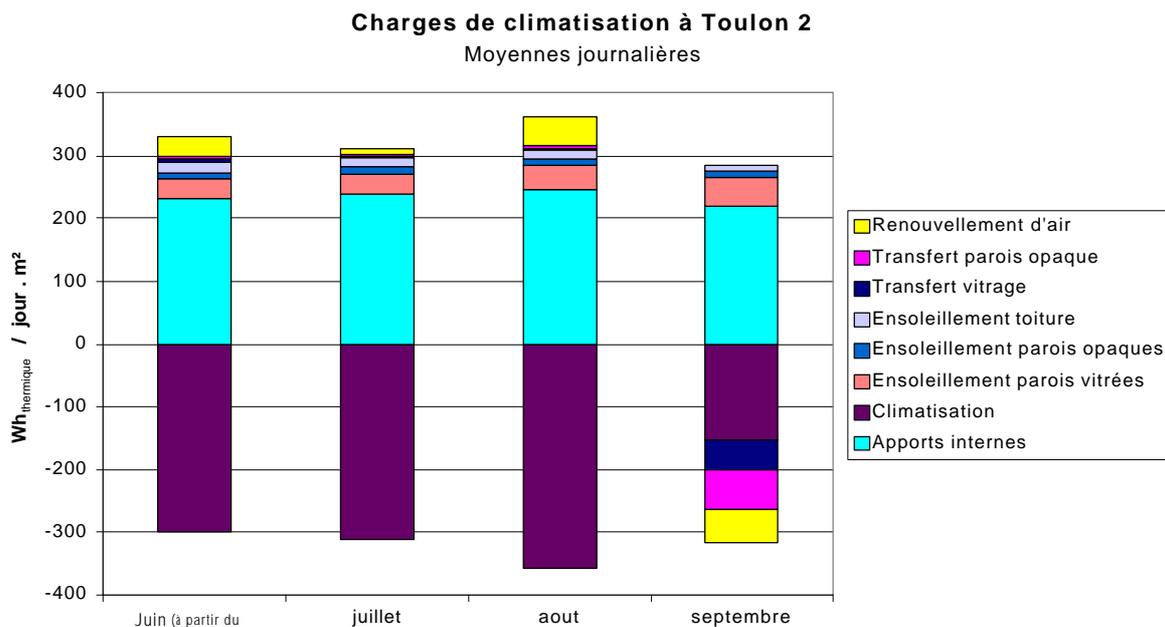


Figure 7.13 : Evaluation des charges de climatisation – TOULON 2

Ce bâtiment est le plus grand de l'échantillon. Il s'élève sur 5 étages. Il présente également les apports internes les plus importants, soit 220 Wh/m²/jour dont moins de 10% sont dus aux apports par les occupants. Les consommations électriques, et en particulier les puissances appelées bâtiment vide sont impressionnantes. Elles représentent une consommation mensuelle moyenne de 5350 kWh en heures creuses (Tarif vert - soit 8 heures par jour + 24 heures le dimanche) qui correspond à une puissance permanente de 17 kW ou 6.2 W/m². Ces consommations s'expliquent par un très fort taux d'équipement en matériel informatique, photocopieuses, imprimantes, distributeurs de boissons dont la plupart semble rester en marche nuit et jour. Les ventilo-convecteurs, au nombre de 108 pour le bâtiment entier, peuvent

également fonctionner en permanence et on peut estimer leur contribution aux apports internes à environ 4 à 5 kW d'apports permanents.

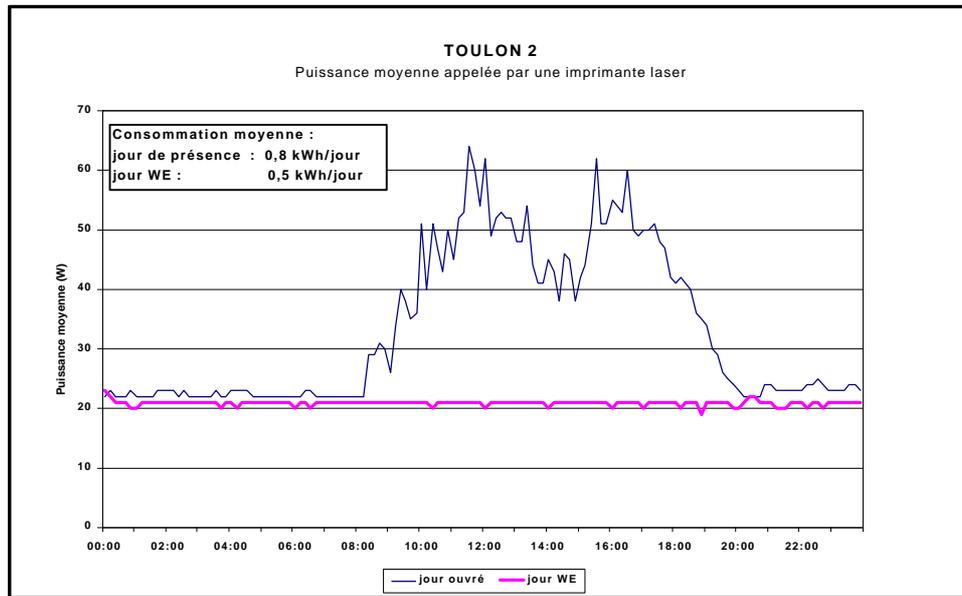


Figure 7.14 : Profil de fonctionnement d'une imprimante laser – TOULON 2

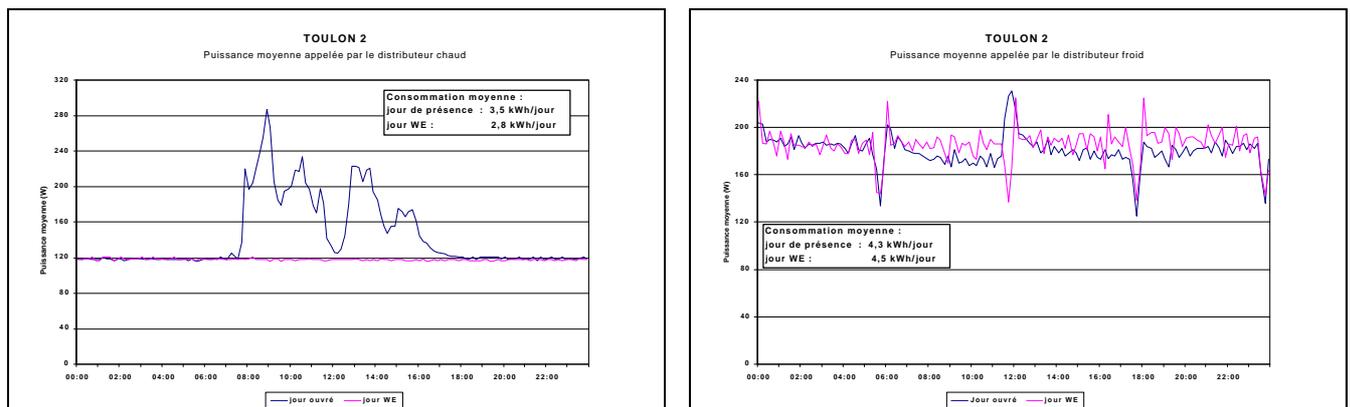


Figure 7.15 : Profil de fonctionnement de deux distributeurs automatiques de boissons - TOULON 2

La toiture, en dépit de sa faible isolation ne représente qu'un apport mineur de chaleur car la surface de toit rapportée à la surface utile de l'ensemble du bâtiment est faible.

Les apports par les vitrages ne semblent pas déterminants dans le bilan thermique du bâtiment de même que les apports par renouvellement d'air, contrôlés par une ventilation mécanique.

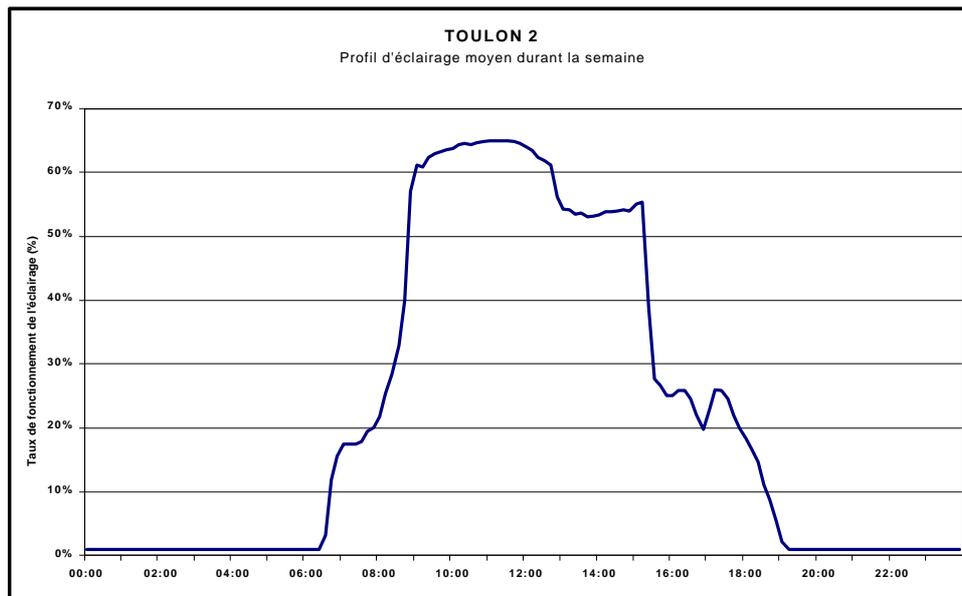


Figure 7.16 : Profil moyen d'éclairage au cours de la semaine – TOULON 2

7.2.6 MOUANS SARTOUX

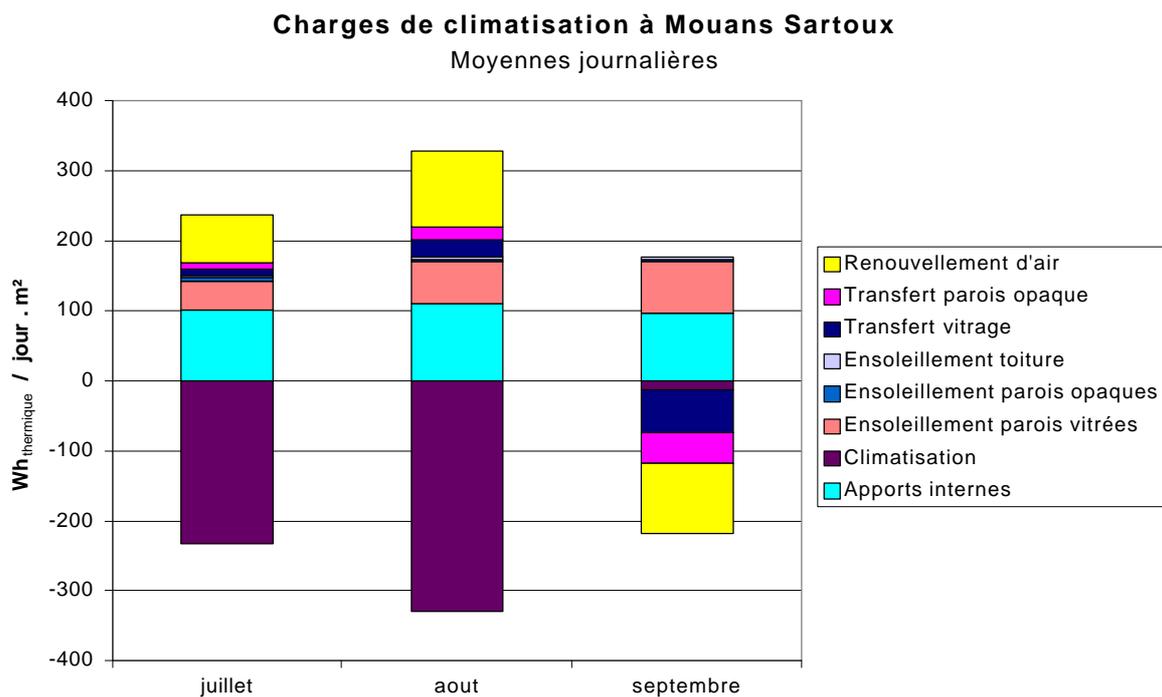


Figure 7.17 : Evaluation des charges de climatisation – MOUANS SARTOUX

Les apports internes sont moyens et se répartissent entre apports par les matériels informatiques, par les personnes, par la pompe de circulation d'eau glacée, par les ventilo-convecteurs (commandés par horloge) et par les appareils en veille ou en fonctionnement permanent.

Les apports par renouvellement d'air sont élevés du fait des fenêtres et portes laissées ouvertes (escalier, salle de détente, salle de réunion) et de la forte humidité de l'air extérieur.

Les performances du système de climatisation sont sensiblement réduites par la présence d'un échangeur air-eau mal ventilé pour l'évacuation des calories du condenseur. Pour des raisons probablement acoustiques et pour l'intégration dans la toiture (qui nécessite une gaine d'évacuation avec un coude et ainsi des pertes de charges non négligeables), le condenseur n'a pas été équipé de son ventilateur axial standard mais d'une soufflerie centrifuge telle qu'utilisée pour la ventilation de locaux (VMC). Le débit d'air étant 2 à 3 fois plus faible que la normale, une hausse importante de température est nécessaire pour que le transfert de chaleur ait lieu. Les mesures effectuées en continu montrent que lorsque le groupe est en fonction, la température de sortie d'air du condenseur dépasse 50°C les après-midi de juillet et d'août. On peut estimer que la température moyenne du condenseur de la pompe à chaleur est augmentée de 8°C à 10°C par rapport à un condenseur classique conduisant à une surconsommation d'énergie de l'ordre de 20% et un COP moyen de seulement 2,5. Le ventilateur du caisson de soufflage, en marche en même temps que le groupe et d'une puissance de 2 kW ajoute encore 12% de pertes. Le bilan énergétique de ce système est catastrophique car il a été mal conçu.

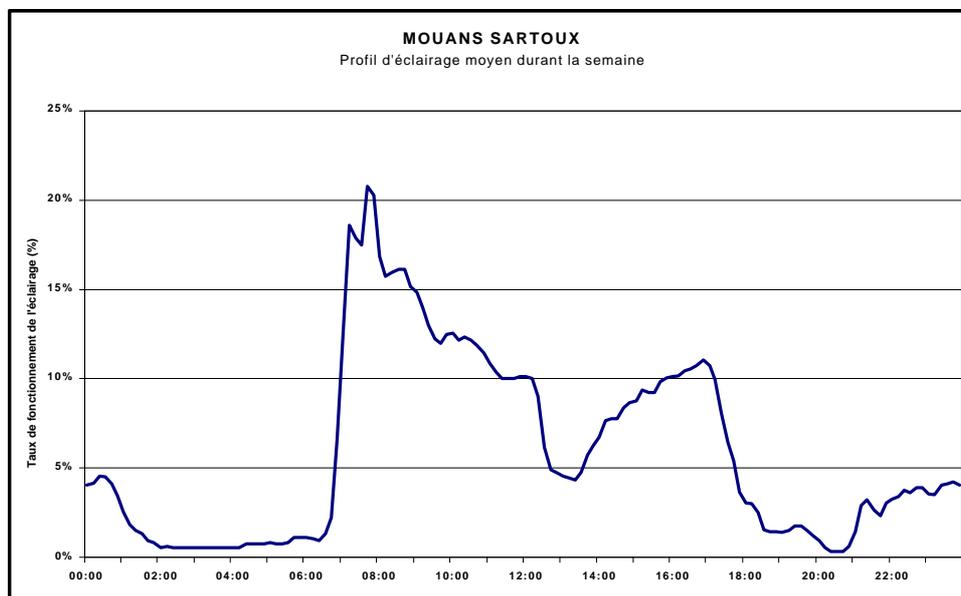


Figure 7.18 : Profil moyen d'éclairage au cours de la semaine – MOUANS SARTOUX
(une partie du bâtiment est utilisée de nuit - poste de police)

Les ventilo-convecteurs sont commandés par des horloges qui pourraient être optimisées (d'autant plus qu'une des horloges a été désactivée après le 14/08/2001). En outre, ni le groupe froid ni la pompe de distribution d'eau glacée ne sont arrêtés la nuit. La consommation du groupe lorsque les ventilo-convecteurs sont arrêtés représente 14% de sa consommation totale et ne sert qu'à maintenir en température le circuit d'eau glacée.

L'installation de climatisation, au premier abord très soignée, cache en réalité des performances très médiocres. La consommation de l'ensemble reste toutefois maîtrisée du fait de charges de climatisation plutôt inférieures aux autres bâtiments.

7.2.7 Conclusion

La figure 7.19 résume la répartition des charges de climatisation au mois d'août dans les six bâtiments. Globalement, les calculs indiquent pour les sites étudiés un poids très important des

apports internes (en particulier électriques) et du renouvellement d'air. Les apports par ensoleillement des toitures représentent également une lourde charge pour les bâtiments non isolés de faible hauteur. La répartition des autres postes présente des disparités importantes d'un site à l'autre.

	Apports internes	Ensoleillement parois vitrées	Ensoleillement parois opaques	Ensoleillement toiture	Transfert vitrage	Transfert parois opaque	Renouvellement d'air
Avignon	22%	33%	4%	6%	1%	1%	34%
Marseille 1	39%	21%	14%	3%	-1%	-3%	27%
Marseille 2	36%	19%	17%	36%	-12%	-9%	13%
Toulon 1	41%	11%	2%	11%	2%	3%	31%
Toulon 2	68%	11%	3%	4%	1%	1%	13%
Mouans-Sartoux	34%	18%	1%	1%	8%	5%	33%
Moyenne	40%	19%	7%	10%	0%	0%	25%

Figure 7.19 : Répartition des charges de climatisation dans les 6 bâtiments étudiés mois d'août

Il faut toutefois noter que le bilan des charges de climatisation varie énormément au fil de la journée. Lors des pointes, vers 15 - 16 heures, les températures extérieures sont élevées et la part des apports par les parois, les vitrages et le renouvellement d'air sont sensiblement accrues, en particulier pour les bâtiments peu isolés. Les charges de climatisation à ce moment sont 2 à 3 fois supérieures aux charges moyennes journalières. Contrairement aux bâtiments d'habitation, l'inertie de la structure, même légère, semble suffisante pour passer les moments de pointe en raison des déphasages des apports solaires indirects et parce que les personnels quittent les sites relativement tôt dans la journée.

8. PROPOSITIONS D'AMELIORATION DES PERFORMANCES ENERGETIQUES

8.1 APPORTS INTERNES

Sur l'ensemble des sites étudiés, les apports internes et notamment électriques constituent le premier apport d'énergie à l'intérieur des bâtiments. La réduction de ces apports présente le double avantage de diminuer la consommation électrique directe et les dépenses de climatisation. En outre, l'amortissement des investissements peut se faire sur une durée plus importante et avec des coûts d'énergie supérieurs.

A noter que les matériels de climatisation eux-mêmes constituent des apports internes très importants, en particulier lorsque les ventilo-convecteurs ne sont pas commandés par une horloge. Des solutions spécifiques sont précisées dans ce chapitre concernant les systèmes de climatisation.

8.1.1 Apports internes hors occupation

Les puissances atteintes hors occupation des locaux sont importantes, variant de 2 à 6 W/m² selon les sites. Il est relativement facile de les évaluer à partir des consommations d'énergie observées en heures creuses ou encore grâce aux mesures à 10 minutes réalisées sur l'alimentation générale des bâtiments.

Les matériels de bureautique en veille ou en fonctionnement permanent, les serveurs réseau, centraux téléphoniques, onduleurs et gros photocopieurs semblent à l'origine de la majeure partie de ces consommations. Les locaux informatiques présentent des consommations permanentes mesurées de un à plusieurs kilowatts selon les sites suivis. Certaines baies de serveur sont équipées de leur propre unité de climatisation rejetant la chaleur dans le local.

Les veilles de certains appareils de bureautique (ordinateurs, écrans, scanners, imprimantes, modems, fax, minitels...) entraînent des consommations typiques de 10 à 50 watts par poste.

8.1.2 Matériel informatique

Les taux d'équipement en matériel informatique varient sensiblement d'un site à l'autre. De même, le comportement de certains utilisateurs est très économe avec une extinction systématique en cas d'absence prolongée tandis que d'autres laissent leur ordinateur en marche permanente, week-end compris. Enfin, quelques ordinateurs sont visiblement équipés du système Energy Star qui permet de diminuer la consommation lors des périodes de non utilisation. La taille des écrans joue également un rôle important.

L'énergie journalière utilisée par poste est finalement comprise entre 1 et 3 kWh par jour.

8.1.2.1 Solutions de réduction des consommations de veille

La solution la plus simple serait d'éduquer le personnel afin qu'il arrête son ordinateur dès qu'il ne s'en sert plus, et en tout cas lors de la coupure de midi et le soir. Une autre solution se développe aujourd'hui pour les PC en réseau : c'est l'arrêt par le gestionnaire du réseau de

l'ensemble des machines en soirée. A défaut, la gestion de la veille au quotidien passe par des gestionnaires de veille. La plupart des ordinateurs vendus actuellement possède le label Energy star ce qui signifie notamment que lorsqu'ils ne sont pas utilisés pendant un laps de temps déterminé et paramétrable, ils passent en état de veille. L'état de veille est défini comme un état dans lequel la consommation électrique est abaissée mais qui n'entrave pas le bon fonctionnement de la machine. Cependant, très souvent la mise en veille automatique n'est pas activée par le revendeur ou encore désactivée à la mise en service de l'appareil par le département informatique. En effet, des problèmes de compatibilité ont été rencontrés avec les premières versions du logiciel ; de ce fait les responsables informatiques préfèrent maintenant enlever cette fonctionnalité afin d'éviter tout problème.

Il existe d'autres systèmes permettant de diminuer les consommations du matériel de bureautique quand il n'est pas utilisé. Il s'agit de boîtiers connectés à l'appareil dont on veut réduire la consommation. Ils activent une fonction veille peu consommatrice (généralement de puissance inférieure à 1W) quand l'appareil n'est pas utilisé et le remettent en marche dès qu'il est sollicité par l'utilisateur. Ces boîtiers s'avèrent très intéressants dans le cas de machines anciennes qui ne possèdent pas de système de mise en veille automatique ou encore d'autres non compatibles Energy Star. Enfin, ils peuvent être très utiles dans le cas d'un refus d'utilisation d'un logiciel de gestion intégré. Il en existe pour les écrans, les périphériques (imprimantes, scanner, haut-parleurs), les télécopieurs et enfin les photocopieurs.

Fournisseur	Nom du produit	Fonctionnement	Application	Prix (€HT)
D-i-K Powersafer	Powersafer FX20	- Met en marche le fax au moment de l'appel et l'arrête une fois terminée	Fax	51,10
	Powersafer Desktop	- Eteint l'ensemble des appareils connectés après 3,7, 13, ou 20 minutes de non utilisation du clavier ou de la souris - L'actionnement du clavier ou de la souris remet en marche l'ensemble des appareils connectés	Ecran, imprimante, scanner, haut-parleurs...	35,76
	Powersafer Printer	- Eteint une imprimante après quelques minutes de non-utilisation - L'envoi d'une impression l'actionne à nouveau	Imprimante	
	Powersafer Copy	- Eteint le photocopieur après aucune détection de présence pendant xminutes (1-60min réglable) - Le passage d'une personne la remet en route immédiatement	Photocopieur	51,10
EMT	Memoswitch lazy	- Mémorise les habitudes de l'utilisateur et met en route l'appareil en fonction	Photocopieur, distributeurs automatiques de boisson	90,00

Figure 8.1 : Description des différents boîtiers gestionnaires d'énergie

8.1.2.2 Utilisation de matériel performant

Depuis quelques années, on a vu apparaître un nouveau type d'écran très économe en énergie : les écrans plats ou LCD. Les modèles 15'' consomment environ 20W, soit environ quatre fois moins que leurs équivalents, en taille d'image, cathodiques de 17''. Comme toutes nouvelles technologies, les premiers milliers d'exemplaires coûtaient très chers, les ventes se limitant à des applications spécifiques demandant une grande qualité d'image. Depuis peu ce type de matériel est proposé à des prix accessibles ; le surcoût par rapport à un écran cathodique diminue.

On peut aussi conseiller l'utilisation d'ordinateurs portables (quand cela est possible) en remplacement des ordinateurs de bureau. En effet, ils consomment environ trois fois moins d'électricité.

8.1.3 Eclairage des bureaux

Durant la période de climatisation, les heures ouvrables sont toujours comprises pendant des heures de jour. L'éclairage naturel est donc généralement important sauf pour les bureaux peu vitrés, les circulations ou encore lorsque les brise soleil atténuent trop la lumière extérieure.

Pour les sites bénéficiant d'éclairage naturel important, tels qu'Avignon, la fraction moyenne d'allumage des éclairages est d'environ 10% sur les heures ouvrables. Dans des sites moins exposés (film sur les vitrages à Toulon 2 au rez de chaussée), moins vitrés (Marseille 2) ou nécessitant un éclairage important (dessin industriel à Marseille 1), les durée d'allumages sont bien plus élevées.

Les éclairages représentant une puissance installée de 5 à 20 W/m², les consommations surfaciques journalières obtenues en période de climatisation sont comprises entre 5 et 75 Wh/m²/jour.

8.1.3.1 Solutions d'économies d'électricité

Les luminaires les plus utilisés dans les bureaux se composent de tubes fluorescents T8, de ballasts ferromagnétiques et ne sont généralement pas munis de réflecteurs. Les améliorations envisageables peuvent donc porter sur ces trois points :

1. *Tubes* : les tubes T5 sont actuellement les plus performants. Ils consomment près de 10% de moins qu'un tube T8 pour une quantité de lumière équivalente (78lm/W pour un tube T5 de 14W contre 72lm/W pour un tube T8 18W). De plus, ils contiennent moins de mercure que les tubes T8 standards. Cependant, ils sont encore chers. Etant moins longs, ils ne peuvent s'utiliser directement en remplacement des tubes T8 et nécessitent donc des luminaires adaptés. Ils ne fonctionnent qu'avec un ballast électronique.
2. *Ballasts* : les modèles électroniques sont plus performants que les ferromagnétiques. Ils consomment moins et augmentent l'intensité lumineuse. Par exemple, le remplacement d'un ballast ferromagnétique par un ballast électronique sur un luminaire 2x58W permet une économie d'énergie d'environ 25%, une amélioration de la qualité de l'éclairage (démarrage rapide, absence de scintillement...) et un allongement de la durée de vie des tubes. Cependant, ils sont actuellement 3 à 4 fois plus chers à l'achat que les ballasts standards.
3. *Réflecteurs* : Afin d'améliorer ses performances, le luminaire doit être muni d'un **réflecteur**. Celui-ci permet d'éviter le rayonnement uniforme du tube fluorescent dans toutes les directions, il concentre donc le flux lumineux dans la zone désirée. S'il est muni d'un film d'argent, il permet une réflexion de 95% contre 78-90% pour un réflecteur en aluminium grand brillant et 60-88% pour un réflecteur en acier prélaqué blanc neuf. Les caractéristiques de la grille de défilement doivent aussi être optimisées afin d'empêcher tout éblouissement. Plus particulièrement dans le cas des luminaires pour tubes T5, il est impératif de choisir des optiques élaborées pour obtenir une basse luminance. Le rendement des luminaires varie de 45 à 75%, induisant un écart de consommation de 40% entre les modèles les meilleurs et les moins bons.

8.1.4 Autres apports électriques

Un grand nombre d'autres appareils électriques représentent des dégagements de chaleur importants. Il s'agit en particulier des distributeurs de boissons (chaudes et froides), machines à café, chauffe-eau électriques, réfrigérateurs et autres appareils des cuisines.

8.1.4.1 Solutions d'économies d'électricité

La majorité de ces appareils disposent de solutions spécifiques. Les horloges sont la plupart du temps adaptées pour éviter les consommations nocturnes et de week-end mais bien d'autres possibilités peuvent être envisagés : jaquettes isolantes pour les chauffe-eau, utilisation d'appareils de classe A pour les réfrigérateurs...

Des informations à destination des occupants pourraient mettre en avant l'économie d'énergie et l'augmentation du confort d'été par des gestes simples (coupure des machines à café...) et reproductibles également au domicile des personnels.

8.2 RENOUELEMENT D'AIR

L'utilisation des systèmes de climatisation ne semble pas perçue par les occupants comme l'est un système de chauffage. Ainsi, il ne paraît pas choquant de maintenir fenêtres et portes grandes ouvertes alors que des climatiseurs sont en fonction dans d'autres bureaux. Les matériels semblent vus comme des ventilateurs soufflant un air rafraîchi sans lien particulier avec les apports de chaleur du bâtiment, ni avec leur consommation d'électricité.

Compte tenu des différences notables de température entre l'intérieur et l'extérieur en période de chauffe, les ouvertures ne peuvent être maintenues durablement sans générer un inconfort. De plus, lors de l'arrivée des occupants le matin en hiver, l'écart est maximal ce qui incite à veiller à fermer portes et fenêtres. Il en va tout autrement en période de climatisation : la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est réduite et en particulier en début de journée, elle est souvent plus fraîche au dehors qu'au dedans. Pour les occupants, il est donc agréable d'ouvrir autant que possible le bâtiment. Lorsque la température extérieure s'accroît, rares sont ceux qui s'en préoccupent immédiatement. Les ouvrants ne sont fermés que lorsque le confort n'est plus acceptable, c'est à dire généralement bien après le croisement des températures. Les portes d'entrées et fenêtres des circulations, pour lesquelles personne n'est responsable, sont encore moins bien contrôlées.

Du point de vue énergétique, il est extrêmement difficile de quantifier l'impact de ces ouvertures car il permet à la fois d'évacuer des calories en début de journée mais constitue ensuite un apport très variable mais très lourd. La différence de température modérée et la faible chaleur massique de l'air font que la charge sensible apportée est limitée : 1000 m³ d'air à une température de 3 degrés au dessus de l'air ambiant constituent un apport de 1 kWh qui ne nécessite qu'environ 300 Wh de climatisation. En revanche, l'humidité apportée peut être considérable, notamment en bord de mer, et peut atteindre 5 litres d'eau pour le cas précédent soit 3.5 kWh !

Les mesures de volume de condensats effectuées sur les sites d'Avignon, Marseille 1 et Toulon 1 révèlent des valeurs très importantes : de 1 à 4 litres par jour en moyenne sur la saison de climatisation par ventilo-convecteur utilisé et plus d'un litre par heure en pointe ! L'humidité ambiante n'est significativement réduite que lorsque l'humidité extérieure est très forte, lors des fortes pointes de climatisation. Il est fort probable qu'à ces moments, les occupants

commencent à fermer portes et fenêtres pour maintenir un confort acceptable. La quantité de condensats est donc en règle générale limitée par la capacité de déshumidification du ventilateur-convecteur, qui dépend notamment de l'humidité intérieure et la température de soufflage de l'air refroidi.

Compte tenu du faible écart entre humidité intérieure et extérieure et des apports variables d'humidité par les occupants (évalués à 60g/h/personne), l'estimation du renouvellement d'air à partir des quantités recueillies de condensats présente une incertitude notable. Les mesures indiquent toutefois sans conteste des niveaux très élevés de renouvellement d'air, d'environ 1 à 3 volumes par heure. Durant la nuit en revanche, les débits trouvés sont proches de ceux prévus par le système de VMC. Ce test a été effectué à Avignon en laissant un climatiseur en fonction, bâtiment et bureau fermé. Ces mesures n'ont pas été possibles à Toulon où la climatisation ne peut être mise en marche durant la nuit.

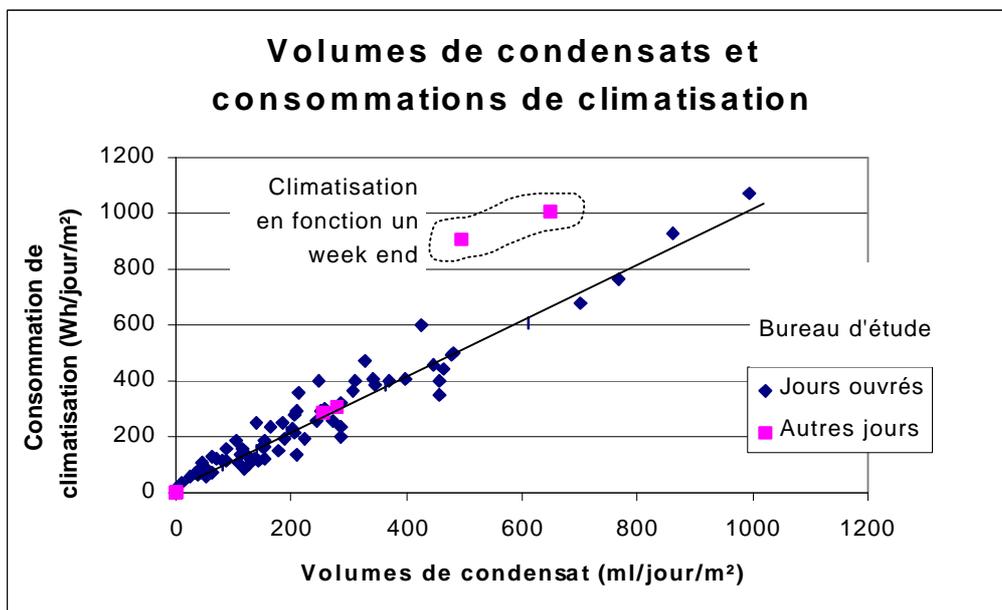


Figure 8.2 : Illustration de la relation de proportionnalité existant entre la consommation de climatisation et les volumes de condensats - AVIGNON

En définitive, le renouvellement d'air est à l'origine d'une charge de climatisation très importante en particulier du fait des apports d'humidité. Entre le quart et le tiers de la consommation des groupes frigorifiques (hors auxiliaires) sert à la déshumidification. L'humidité est en grande majorité apportée par le renouvellement d'air et dans une moindre mesure par les occupants. Cette seconde source d'humidité est à l'origine de moins de 10% des apports sauf dans le cas du site de Toulon 1, accueillant du public, où on peut estimer sa part à environ 20 à 25% du total des apports.

8.2.1.1 Solutions d'économies d'électricité

La maîtrise des renouvellements d'air demande une sensibilisation des occupants car la majorité du débit est due à des ouvertures manuelles et non aux ventilations mécaniques. L'important est d'éviter que des climatiseurs fonctionnent lorsque des portes ou fenêtre restent ouvertes

dans le même bâtiment car il a été observé que les portes intérieures sont généralement ouvertes. En effet, la migration de la vapeur d'eau est plus rapide encore que celle de l'air.

Il semble possible d'envisager de mettre en place des dispositifs qui réduisent le fonctionnement de la climatisation lorsque des portes ou fenêtres sont ouvertes.

Idéalement, forcer alors la température de soufflage des ventilo-convecteurs à une température supérieure au point de rosée de l'air ambiant réduirait fortement la charge latente de climatisation due au renouvellement d'air, mais aussi le niveau de confort (degré hygrométrique plus élevé). La mise en œuvre du système et son acceptation peut toutefois poser des problèmes.

Un dispositif de maintien des portes d'entrée ouverte lorsque cela est souhaitable seulement pourrait être mis en œuvre. Un système tel que celui employé pour les portes coupe feu (ressort et électro-aimant de maintien en position ouverte) mais commandé par la différence de température (ou d'enthalpie) entre l'air intérieur et l'extérieur permettrait de s'assurer que la porte se referme au moment adéquat.

8.3 ISOLATION DE TOITURE

Les apports par l'ensoleillement des toitures varient d'un facteur 1 à 10 selon les sites observées. L'isolation de la toiture, le nombre d'étages du bâtiment, la couleur et le type de revêtement de toiture sont les paramètres qui influent de façon déterminante sur la quantité d'énergie transmise par ce biais.

A Avignon, la présence d'une toiture métallique, très pénalisante en terme de climatisation, est compensée par une bonne isolation (160 mm de laine minérale). A Mouans Sartoux et Marseille 1, un espace de grenier sous les toitures tuiles limitent fortement les apports. Les toitures terrasses des bâtiments Toulon 1 et 2 (non isolées) et Marseille 2 (40 mm de polystyrène) constituent en revanche de forts vecteurs d'apports. L'étanchéité de toiture à Marseille 2 est assurée par un revêtement bitumineux sombre, directement exposé au soleil. Les toitures terrasses à Toulon ne sont protégées que par une couche de gravier, initialement blancs.

L'isolation correcte des bâtiments de Toulon 1, Toulon 2 et Marseille 2 constituerait une solution d'économie de climatisation non négligeable. Elle améliorerait en outre le confort des occupants (limitation de la température du plafond) et permettrait de réduire les charges de chauffage. L'isolation des toitures terrasses en rénovation est en règle générale possible à des coûts de l'ordre de 15 € par mètre carré de toiture.

8.4 AMELIORATION DES SYSTEMES DE CLIMATISATION

8.4.1 Ventilo-convecteurs :

Les ventilo-convecteurs constituent des apports internes non négligeables. En effet, le rendement peu élevé des moto ventilateurs utilisés entraîne des consommations de 30 à 100 Watts selon les modèles et les vitesses choisies. La quasi totalité de cette énergie termine sous forme de chaleur transmise au flux d'air soufflé. Ces seuls apports peuvent atteindre 2 à 2.5 kWh par jour par bureau.

8.4.1.1 Solutions d'économies d'électricité

Les solutions permettant de réduire ces apports sont multiples :

- a. Installation ou réglage optimal des horloges d'autorisation des convecteurs. (l'asservissement pourrait être basé sur l'écart entre la température intérieure et extérieure - interdisant leur mise en route lorsque cet écart est négatif, mais risquerait alors de présenter des difficultés d'acceptation pour certains utilisateurs de climatisation)
- b. Détecteurs de présence assurant l'arrêt en cas d'inoccupation de la pièce.
- c. Sensibilisation des utilisateurs.
- d. Choix des ventilo-convecteurs. Il existe des ventilateurs plus performants (équipés de moteur à courant continu ou contrôlés électroniquement) qui permettraient des gains très significatifs mais qui ne semblent pas encore disponibles sur les appareils standards.

Dans le bâtiment Toulon 1, pourtant déjà équipé d'horloges, la mise en route des ventilo-convecteurs et du groupe froid sont décalés. Si les horloges étaient bien réglées et utilisées pendant toute la période de climatisation, l'économie atteindrait 642 kWh, soit 6% de la consommation totale de climatisation (groupe froid, auxiliaires et ventilo-convecteurs).

8.4.2 Pompes de circulation d'eau glacée :

Les pompes de distribution de l'eau glacée ne sont pas situées dans les locaux climatisés. Cependant, la chaleur dégagée par les moteurs et les pertes d'aubages est en grande majorité entraînée par le fluide froid et constitue donc bien une charge pour le système de climatisation. La réduction de leur consommation est donc encore une fois doublement profitable.

Ces pompes sont généralement dimensionnées pour assurer un débit élevé afin d'apporter une quantité de froid importante avec un faible écart de température entre le départ et le retour. Ceci garantit une source froide de l'appareil frigorifique à une température proche de la température de soufflage d'air des ventilo-convecteurs. Un écart plus important se traduirait par une baisse de la performance du cycle frigorifique : une diminution d'un degré de la source froide (autour de 6°C) conduit à une hausse typique de 2% de la consommation d'énergie de climatisation. Le dimensionnement de cette pompe est donc un compromis entre sa consommation et la perte de COP résultant d'une pompe à débit inférieur. (Le choix du réseau et de ses éléments pour limiter les pertes de charge influe beaucoup et devrait faire l'objet d'une étude approfondie en construction neuve).

8.4.2.1 Solutions d'économies d'électricité

De nombreuses pistes sont possibles pour réduire les consommations de ces pompes :

1. Mise en place d'horloge bien ajustées ou commande simultanée à l'autorisation du groupe froid.

2. Variation du débit. Cependant, les fabricants de groupe imposent des débit élevés qui doivent être maintenus au moins lorsque les compresseurs fonctionnent (à cause du risque de givre sur l'évaporateur). Le reste du temps, le débit peut être réduit, la régulation étant soit basée sur un écart de pression maintenu constant au niveau de la pompe, soit sur la température de retour à maintenir inférieure à 12°C. La réduction moyenne serait de l'ordre de 30 à 60% du débit nominal et génèrerait une diminution de puissance appelée de 50 à 80% entraînant une baisse de consommation électrique moyenne supérieure à 50%. En effet, les compresseurs, dimensionnés pour les pointes de climatisation, ne fonctionnent en général qu'un faible pourcentage du temps (de l'ordre de 25 à 30% mais sensiblement plus pour les modèles à plusieurs compresseurs ou à variation de puissance (inverter))
3. Découplage de la production et de la distribution d'eau glacée, les pompes primaires, à fort débit, étant mises en fonction en même temps que les compresseurs et bouclant sur le ballon tampon d'eau glacée. Les pompes de distribution, peuvent être à débit variable afin de s'adapter automatiquement au nombre de ventilo-convecteurs en marche.
4. Utilisation de pompes à meilleur rendement (aubages et moteurs performants)
5. Diminution des pertes de charge du réseau en construction neuve.

Il convient aussi de remarquer que ces pompes sont souvent également utilisées en période de chauffage. Ainsi, la variation de vitesse peut être utilisée en hiver, avec éventuellement d'autres paramètres et accroître la rentabilité de cette action de MDE.

8.4.3 Coefficient de performance

La production de froid se fait avec une efficacité d'autant meilleure que l'écart de température entre source froide et chaude est réduit. L'amélioration des performances des groupes frigorifiques est liée à une température d'évaporation la plus forte et une température de condensation la plus basse possible.

Dans les systèmes à détente directe, la température d'évaporation est également celle de la batterie froide du ventilo-convecteur situé dans la pièce à climatiser. La distribution d'une certaine quantité de froid peut être obtenue avec une température moins froide (améliorant donc le COP) compensée par un débit de soufflage plus important. La condensation d'humidité est alors réduite ce qui, en outre, accroît l'énergie produite sous forme sensible. Le nettoyage des filtres, entraînant des débits d'air accrus au travers de la batterie, est donc une source d'économie d'énergie de climatisation; (la plupart des filtres observés étaient absents ou encrassés.)

La température de condensation est liée à la température extérieure et au débit de ventilation du condenseur. Un compromis est réalisé entre la consommation ajoutée des ventilateurs (généralement axiaux et dont les puissances peuvent atteindre quelques centaines de watts) et l'augmentation du COP. La position du condenseur et l'obturation de ses ouvertures ont un impact notable sur les performances. Le refroidissement par évaporation d'eau au niveau du condenseur est très efficace: l'aspersion des condensats d'un bâtiment sur le condenseur du groupe doit permettre une diminution de 2 à 4°C de la température du condenseur et correspond à environ 5 à 10% d'économie d'énergie.

En ce qui concerne les groupes centralisés à eau glacée, la température d'évaporation est imposée par le choix du régime de fonctionnement des ventilo-convecteurs, habituellement de 6-12°C. Le groupe est mis en fonction lorsque la température de l'eau de retour dépasse 12°C et s'arrête quand la température de départ est inférieure à 6°C. Un ballon tampon évite les démarrages trop fréquents du compresseur.

Ce choix de consignes fixes est pénalisant sur le plan énergétique. En effet, l'eau glacée est toujours préparée à 6°C pour produire de l'air dont une température de soufflage de 16 à 18°C est suffisante la plupart du temps. L'adaptation de la production d'eau glacée aux besoins de froid, par exemple au moyen d'un régulateur agissant en fonction de la température extérieure, permettrait d'obtenir une température de départ variable entre 6 et 14°C par exemple ce qui induirait un gain de consommation d'environ 10% d'énergie pour le groupe. Certaines régulations de compresseurs offrent déjà un choix de plusieurs points de consigne mais a priori pas de variation continue en fonction de la température extérieure.

Enfin, la durée des cycles de marche des compresseurs pourrait être optimisée : plus ils sont brefs et meilleur est le rendement car les évaporateurs et condenseurs ont un écart de température qui s'accroît avec le prolongement du fonctionnement. Un compromis doit être réalisé car les moteurs ne peuvent supporter un nombre trop important de mises en marche. A Mouans-Sartoux, l'arrêt nocturne des groupes évitera de nombreux cycles de mise en marche inutiles. Ainsi, il est possible d'accroître la fréquence des démarrages en journée sans réduire la durée de vie. Des cycles tels que 8-12 (voire 10-12°C si la régulation est programmée en outre de façon à laisser le compresseur en fonction pendant une durée minimale à définir) conduiraient à une hausse de la température moyenne d'évaporation de 1.5 à 3°C soit 3 à 6% d'économie.

Les groupes frigorifiques utilisant la variation de vitesse (Inverter) ou plusieurs compresseurs en cascade (et bien étagées ce qui ne semble pas être le cas à Toulon 2 par exemple) permettent des gains significatifs de performances, en particulier à charge partielle. Les COP moyens de référence sur une saison peuvent approcher les 5 (dans des conditions qui sont difficiles toutefois à atteindre en pratique). La rentabilité économique des appareils performants de climatisation se heurte au faible coût de l'électricité en été. Seule la réglementation et l'étiquetage des matériels sont à même de faire évoluer l'offre vers des appareils de meilleure qualité.

8.5 CONTROLE DES APPORTS PAR LES VITRAGES

Les charges de climatisation constituées par les vitrages sont importantes pour tous les bâtiments suivis. Les apports sont à la fois directs, par l'ensoleillement traversant la vitre, et aussi, dans une moindre mesure, par transfert de chaleur entre l'air extérieur plus chaud et l'air intérieur. Les vitrages exposés peuvent également constituer des parois chaudes rayonnantes et génératrices d'inconfort.

Les simples vitrages présentent un taux de transmission énergétique et une conduction thermique élevés. La proportion de l'énergie solaire pour un vitrage orienté en façade sud pendant la période de climatisation passe ainsi de 70 à 50% si l'on utilise des doubles vitrages (calcul effectué pour le bâtiment Toulon 2 à partir des mesures réelles d'ensoleillement sur site). Les vitrages simples équipent pourtant encore tout ou partie de nombreux bâtiments (Marseille 1, Marseille 2, Toulon 2, Mouans-Sartoux).

La position du plan de vitrage par rapport au plan de la façade est importante. Un recul de 22 centimètres pour une fenêtre de 1.4 mètres de largeur et 1.3 mètres de longueur permet de diminuer de 27% les charges de climatisation par l'ensoleillement du vitrage.

8.5.1.1 Solutions d'économies d'électricité

De nombreuses dispositions constructives existent afin de profiter au maximum de la lumière naturelle et se prémunir des apports solaires. Les façades entièrement vitrées sont une hérésie de ce point de vue car les vitrages placés à proximité du sol représentent presque uniquement un apport de chaleur. Les brise soleil horizontaux (étagères à lumière) qui renvoient la lumière vers le plafond permettent un éclairage naturel plus homogène, plus confortable et diminuent sensiblement les apports d'énergie à proximité immédiate des fenêtres.

Le choix des vitrages ou l'ajout de films techniques peut accroître le rapport lumière et énergie transmise. Certaines vitres présentent un rapport deux fois supérieur aux vitrages classiques. Du point de vue climatisation, c'est un avantage indéniable qui doit toutefois être nuancé dans nos régions du fait de besoins accrus pour le chauffage en hiver. Les vitrages peu émissifs réduisent sensiblement la quantité de chaleur transmise par le soleil, en particulier lorsque l'angle d'incidence est élevé. Leur résistance thermique permet en outre de diminuer encore les apports par conduction.

Sur le plan énergétique, l'éclairage naturel est intéressant car il présente un bon rendement (de l'ordre de 200 lumen par Watt) c'est à dire que pour une quantité de lumière fournie identique, il apporte bien moins de chaleur que les éclairages artificiels, même fluorescents. Cependant, dans les bureaux très vitrés, les niveaux de luminosité naturelle obtenus sont tels qu'ils correspondent à un apport notable de chaleur. Une surface raisonnable de vitrage de qualité et une distribution astucieuse de la lumière dans les pièces semblent le compromis idéal pour allier confort et performance énergétique.

8.6 INERTIE DES LOCAUX

L'inertie des bâtiments est généralement analysée comme un paramètre positif du point de vue du confort d'été. Dans le cas de locaux à usage d'habitation non climatisés, le maintien d'une température confortable en fin de journée est directement lié à la possibilité de stocker les apports de chaleur de la journée et de les évacuer durant la nuit.

Pour les bureaux climatisés en revanche, la possibilité de réaliser ce déstockage lorsque la température extérieure le permet est réduite du fait de l'absence d'occupant à ces moments. Un renouvellement d'air de l'ordre de 30 m³/h et par mètre carré de bâtiment est nécessaire pendant 6 heures (avec une température intérieure supposée supérieure de 5°C à la température extérieure) pour transférer les charges de climatisation de 300 Wh/m² observées dans tous les sites observés en août.

Les systèmes de ventilation mécanique classiques ne peuvent brasser de tels volumes et le faible écart de température jour nuit à proximité de la mer rend quelque peu aléatoire cette possibilité. Les apports des week-ends devraient en outre être évacués rapidement le lundi matin.

Sur le site Marseille 1 cependant, les murs non isolés de forte épaisseur et le fait qu'une partie du bâtiment soit enterrée conduit, en l'absence de climatisation à des températures très confortables au rez-de-chaussée. L'arrivée matinale (7h30) des occupants permet, par ouverture des fenêtres, de rafraîchir le bâti. Les températures les plus élevées se produisent en

fin de journée alors que les personnels ont quitté les lieux et les déperditions par les parois s'inversent alors pendant la nuit.

Ce type de bâtiment est toutefois en contradiction avec les contraintes de performance thermique de chauffage. Dans les bureaux, il est généralement préférable de minimiser l'inertie afin de profiter au mieux de l'intermittence. Dans le cas du bâtiment de Marseille 1, chauffé à l'électricité durant l'hiver (climatisation réversible et convecteurs), il est probable que la facture énergétique est sensiblement alourdie par la forte inertie du bâtiment.

Les autres sites étudiés présentent des inerties moyennes à faibles (Avignon) mais il ne semble pas que l'inertie constitue actuellement un facteur déterminant des consommations de climatisation.

Cet aspect devra néanmoins faire l'objet d'études de confirmation.

CONCLUSION, PLAN D' ACTIONS

Les apports internes sont élevés dans tous les sites. Les matériels électriques et en particulier informatiques sont à l'origine de la grande majorité de ces charges. Les serveurs réseau, onduleurs, baies télécoms, souvent regroupés dans un local informatique sont climatisés en permanence, à des températures souvent très basses et peuvent représenter à eux seuls un tiers des dépenses de climatisation. De nombreux autres appareils ainsi que les éclairages contribuent aussi au bilan et ceux qui consomment en permanence (photocopieurs, distributeurs de boissons, fax,) ont un poids très lourd facilement repéré par l'analyse des dépenses d'électricité durant les heures creuses.

A l'intérieur d'un même bâtiment, les charges de climatisation sont peu homogènes, généralement bien plus élevés pour les étages supérieurs. L'ouverture de fenêtres suffit à assurer le confort de certains bureaux tandis que pour d'autres, la climatisation est nécessaire dès le matin. Les portes intérieures étant le plus souvent ouvertes, les systèmes frigorifiques en marche doivent faire face à des renouvellements d'air considérables, notamment en terme d'apport d'humidité.

La cohabitation d'utilisateurs de climatisation et d'occupants ouvrant les fenêtres a été observée sur tous les sites, parfois, mais bien plus rarement, au sein d'un même bureau.

L'isolation des bâtiments est faible à nulle hormis pour les bâtiments récents. Du point de vue de la climatisation, l'isolation de la toiture est essentielle, les autres parois affectant peu le bilan. Le choix de vitrages doubles, à faible émissivité et une protection des apports solaires permettraient des réductions de charges significatives.

Les systèmes de climatisation ont d'une manière générale des performances assez moyennes. Les COP moyens observés sont de l'ordre de 3 sauf lorsque le refroidissement du condenseur est insuffisant. L'amélioration de la régulation par variation de la température de distribution d'eau glacée ou limitation de la durée des cycles compresseur pourrait augmenter sensiblement les efficacités.

Les consommations des auxiliaires et en particulier des pompes de circulation d'eau glacée et des ventilo-convecteurs sont bien souvent négligées alors qu'elles peuvent atteindre près de la moitié de consommations de climatisation ! L'utilisation et le bon réglage d'horloges permet des gains très significatifs de ce point de vue et sont déjà mis en œuvre, avec plus ou moins de réussite, dans certaines bâtiments suivis.

Le comportement des utilisateurs de climatisation est très variable. Plusieurs bureaux restent climatisés en permanence, nuits et week-end compris tandis qu'une courte majorité des occupants contrôlent les mises en marche seulement lorsque cela est nécessaire (ou lorsque les horloges le permettent). Les températures de consigne ne sont atteintes que sur un seul site et sont alors fixées entre 24 et 25°C. Dans les autres bâtiments, les occupants programment une température basse qui provoque un fonctionnement continu des groupes ou des ventilo-convecteurs.

Il est assez remarquable que les personnes qui laissent en fonction continue leur climatiseur n'éteignent pas non plus leur matériel informatique. Il apparaît aussi que les comportements des occupants sont assez proches au sein d'un même bâtiment (ou partie de bâtiment lorsque des

séparations nettes existent), comme s'il existait une "culture d'entreprise" en matière énergétique.

Compte tenu des charges thermiques très lourdes de tous les bâtiments, les niveaux de confort atteints sont acceptables pendant le tiers du temps, mais les températures moyennes restent élevées. Des écarts significatifs existent toutefois et certaines pièces (locaux informatiques ou étages inférieurs) ont des températures généralement plus basses. Compte tenu des apports, l'humidité intérieure reste forte malgré des volumes de condensats importants. Le climat plus sec d'Avignon ou un meilleur contrôle des flux d'air (Marseille 2) permettent une humidité ambiante réduite qui participe notablement à la sensation de confort.

En définitive, la priorité pour les bâtiments actuels concerne avant tout la réduction des apports internes. Il ne paraît pas irréaliste de concevoir un immeuble présentant des charges thermiques fortement réduites (par un facteur d'environ 3 pour des sites classiques avec accueil modéré de public) et pour lequel une ventilation nocturne et l'inertie permettent de se passer entièrement de climatisation. Dans ce cas, l'économie d'investissement en matériel de climatisation devrait permettre de financer les surcoûts liés à l'achat des appareils performants et aux contraintes constructives supplémentaires (surisolation, ventilation efficace à forts débits...).

L'étude et la réalisation de sites pilotes semblent nécessaires pour montrer qu'il est possible en région PACA d'obtenir un confort optimal sans recourir à la climatisation, avec un budget d'investissement identique et des charges fortement réduites. Ce pari semble possible tant il est clair que les bâtiments observés sont autant de pièges à apports internes, de capteurs solaires ou de passoires thermiques ... et au final, de gouffres énergétiques.

Programme d'actions :

- Mise en place de solutions de réductions des apports internes, sensibilisation des occupants et en particulier des responsables informatiques.
- Optimisation au contrôle des groupes et auxiliaires, réglage des horloges.
- Action sur les pompes de distribution d'eau glacée - validation de la vitesse variable sur les bâtiments de Toulon et Mouans-Sartoux.
- Isolation des toitures terrasse (Toulon 1 et 2 et Marseille 2).
- Sensibilisation des occupants en ce qui concerne le renouvellement d'air. Test de portes maintenues ouvertes jusqu'au croisement des températures
- Test de l'acceptation par les utilisateurs de systèmes de climatisation interdits tant que la température extérieure est inférieure à la température intérieure.
- Conception d'un immeuble de bureaux confortable sans climatisation.