



Rapport de recherche

2014

Open Access

This version of the publication is provided by the author(s) and made available in accordance with the copyright holder(s).

Appareils portables de refroidissement par cycle frigorifique et par évaporation : étude de cas sur 14 places de travail d'un bâtiment de bureaux à Genève

Veyrat, Sandrine; De Sousa Fraga, Carolina; Bertholet, Jean-Luc; Hollmuller, Pierre; Lachal, Bernard Marie

How to cite

VEYRAT, Sandrine et al. Appareils portables de refroidissement par cycle frigorifique et par évaporation : étude de cas sur 14 places de travail d'un bâtiment de bureaux à Genève. 2014

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:55669>



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

Appareils portables de refroidissement par cycle frigorifique et par évaporation

Etude de cas sur 14 places de travail d'un bâtiment de
bureaux à Genève

Sandrine VEYRAT
Carolina FRAGA
Jean-Luc BERTHOLET
Pierre HOLLMULLER
Bernard LACHAL

Octobre 2014

Réalisé dans le cadre du Partenariat SIG – UNIGE
Contrat spécifique « AlterClim »
Responsable UNIGE : P. Hollmuller
Responsable SIG : J-M. Zraggen

Groupe Energie
Institut Forel / Institut des Science de l'Environnement
Site Battelle - Bat D - 7 route de Drize - CH 1227 Carouge
www.unige.ch/energie

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement :

- Les participants à cette étude de cas qui se sont portés volontaires pour tester les appareils de refroidissement et remplir les différents questionnaires.
- L'entreprise Bio-Climatisation qui a mis à notre disposition les appareils de rafraîchissement adiabatiques, ainsi que l'entreprise Fust qui a mis à notre disposition les appareils de climatisation.
- les membres du Groupe Energie de l'Université de Genève qui ont participé et aidé à l'élaboration de cette étude, en particulier Eric Pampaloni et Stefan Hunziker.
- Cédric Lambert, de l'Université de Genève, qui a participé à l'élaboration des questionnaires.
- Les Services industriels de Genève (SIG), qui ont financés l'étude.

Table des matières

REMERCIEMENTS	1
TABLE DES MATIÈRES	3
INTRODUCTION	5
<i>Contexte</i>	5
<i>Objectifs et structure de l'étude</i>	8
PARTIE 1 DESCRIPTION DE L'ÉTUDE DE CAS.....	10
1.1 DESCRIPTION DU BÂTIMENT	10
1.1.a <i>Situation</i>	10
1.1.b <i>Enveloppe thermique</i>	11
1.2 DESCRIPTION DES APPAREILS DE RAFRAÎCHISSEMENT.....	11
1.2.a <i>Climatiseurs classiques</i>	11
1.2.b <i>Les rafraîchisseurs adiabatiques (ou les rafraîchisseurs évaporatifs)</i>	12
1.2.c <i>Différents modes</i>	13
1.3 PLAN D'EXPÉRIENCE	13
1.3.a <i>Lieu</i>	13
1.3.b <i>Période</i>	15
1.4 ACQUISITION DES MESURES	15
1.4.a <i>Mesures enregistrées</i>	15
1.4.b <i>Description des systèmes de mesures</i>	16
1.5 QUESTIONNAIRES	19
PARTIE 2 CARACTÉRISATION DES DISPOSITIFS DE RAFRAÎCHISSEMENT.....	21
2.1 DÉBITS ET VITESSES D'AIR	21
2.1.a <i>Description de l'expérience</i>	21
2.1.b <i>Débits d'air</i>	21
2.1.c <i>Vitesses d'air</i>	22
2.2 CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES ET ÉNERGÉTIQUES	25
2.2.a <i>Description de l'expérience</i>	25
2.2.b <i>Les climatiseurs classiques</i>	25
2.2.c <i>Les rafraîchisseurs adiabatiques</i>	31
2.2.d <i>Données constructeur</i>	37
2.3 COMPARAISON ENTRE LES CLIMATISEURS CLASSIQUES ET LES RAFRAÎCHISSEURS ADIABATIQUES.....	38
2.3.a <i>Vitesses d'air</i>	38
2.3.b <i>Température</i>	38
2.3.c <i>Puissance électrique</i>	39
2.3.d <i>Puissance frigorifique</i>	39
2.3.e <i>Energy Efficiency Rating (EER)</i>	39
PARTIE 3 CARACTÉRISATION DES PHASES DE L'EXPÉRIENCE ET FONCTIONNEMENT SUR QUELQUES JOURS	
TYPES	40
3.1 CARACTÉRISTIQUES CLIMATIQUES.....	40
3.1.a <i>Caractéristiques du climat durant la période étudiée à Genève</i>	40
3.1.b <i>Caractéristiques climatiques des trois phases de l'expérience</i>	40
3.2 JOURS TYPES.....	42
3.2.a <i>Phase 1</i>	42

3.2.b	Phase 2	44
3.2.a	Phase 3	47
PARTIE 4	UTILISATION DES DISPOSITIFS DE REFROIDISSEMENT	50
4.1	UTILISATION DES DISPOSITIFS DE REFROIDISSEMENT ET PRÉSENCE DES USAGERS.....	50
4.1.a	<i>Présence des occupants</i>	50
4.1.b	<i>Utilisation des appareils</i>	51
4.1.c	<i>Présence et utilisation</i>	51
4.2	UTILISATION ET CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DES APPAREILS.....	52
4.3	ENCLENCHEMENT DES DISPOSITIFS DE REFROIDISSEMENT	53
PARTIE 5	CONFORT AU SEIN DES BUREAUX.....	55
5.1	SIGNATURE ÉNERGÉTIQUE	55
5.2	TEMPÉRATURE ET CONFORT	58
5.2.a	<i>Normes</i>	58
5.2.b	<i>Résultats journaliers</i>	59
5.2.a	<i>Résultats globaux</i>	61
5.3	HUMIDITÉ RELATIVE ET NOTION DE CONFORT	63
PARTIE 6	PERCEPTION ET SATISFACTION DES USAGERS	65
6.1	PERCEPTION DES USAGERS PENDANT L'EXPÉRIENCE.....	65
6.1.a	<i>Ressentis versus souhaits</i>	65
6.1.b	<i>Comparaison entre les phases de l'expérience</i>	66
6.1.c	<i>Comparaison entre personnes proches et éloignées de l'appareil</i>	66
6.1.d	<i>Comparaison entre les deux types d'appareils</i>	67
6.1.e	<i>Réponses simulées en fonction de la température intérieure</i>	68
6.2	SATISFACTION GÉNÉRALE – CLIMATISATION CLASSIQUE, CLIMATISATION PAR ÉVAPORATION OU ABSENCE DE SYSTÈME... 70	
6.2.a	<i>Satisfaction et besoin de refroidissement</i>	70
6.2.b	<i>Température intérieure</i>	71
6.2.c	<i>Qualité de l'air</i>	71
6.2.d	<i>Bruit</i>	72
6.2.e	<i>Classement des dispositifs</i>	73
	SYNTHÈSE ET CONCLUSION.....	74
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	78
	ANNEXES	79

Introduction

Contexte

La demande de climatisation mondiale augmente régulièrement depuis plusieurs décennies, en raison de l'augmentation de la température globale mondiale (IPCC, 2013), de l'urbanisation amplifiant l'îlot de chaleur urbain (Adnot et al., 2004) et de l'augmentation des besoins de confort dans de nombreux pays. En Chine par exemple, le taux d'équipement des ménages urbains est passé de quelques pourcents en 1990 à plus de 100% en 2009 (Frederiksen et al., 2013). Aux Etats-Unis, le très grand développement de la climatisation durant les années 1960-1980 (Biddle 2008) aboutit aujourd'hui à des taux de saturation de près de 90% dans les secteurs résidentiels et commerciaux (Frederiksen et al., 2013). Le Japon a aussi atteint des taux proche de 100% (Ecoheatcool, 2005).

Au niveau de l'Union Européenne, et pour la période 1985-2003, une comparaison de la demande d'électricité du mois de juillet avec celle d'avril (supposé neutre en chauffage et refroidissement), montre pour chacun des pays de l'UE15 un net accroissement de la consommation électrique estivale (Ecoheatcool, 2005). Cela étant, même si l'année 2003 a dopé les ventes de climatisation, les taux de saturation restent encore faibles et permettent d'imaginer une croissance soutenue ces prochaines années, certains scénarios prévoyant le passage d'une capacité de moins de 400 GW_{th} en 2005 à plus de 900 GW_{th} en 2025 (Hitchin 2013).

Dans le de cadre l'étude européenne citée ci-dessus (Ecoheatcool, 2005), le potentiel brut de refroidissement pour la Suisse a été estimé à 20 TWh_{th}, réparti équitablement entre les secteurs résidentiels et de service. Selon le taux de saturation pris en compte, les auteurs estiment le futur marché potentiel de l'électricité pour le refroidissement entre 4 et 6 TWh_{el} (hors froid commercial). Une étude suisse concernant les enjeux quantitatifs des besoins de froid (Dumortier et.al., 2012) estime qu'environ 14% de la consommation électrique du pays, soit 8 TWh_{el}, concerne la production de froid (froid commercial, froid industriel, frigo/congélateurs et climatisation de confort), dont 1.2 TWh_{el} pour la climatisation de confort (à comparer aux 4 à 6 du potentiel accessible ci-dessus). Les estimations de cette étude sont basées sur des taux de saturation différenciés selon la typologie des surfaces commerciales, multipliés par des consommations spécifiques issues d'une étude de 1990 sur 100 bâtiments de bureaux. Les consommations spécifiques des autres typologies sont estimées à partir de cette même étude, via un facteur multiplicatif basé sur des simulations.

Au niveau genevois, l'Université de Genève (Hollmuller et al., 2011) s'est penchée sur les enjeux actuels et l'évolution de la demande de climatisation du Canton de Genève.

En un premier temps, cette évaluation a été menée sur la base des fiches de synthèse des requêtes d'autorisation de climatisation déposées au Service cantonal de l'énergie, pour la période 1980-2009 (soit depuis l'introduction de l'obligation de déclarer les installations de climatisation de plus de 10 KW). Ces requêtes couvrent les demandes de froid de confort (à l'exclusion des appareils mobiles), ainsi que pour les datacenters. Elles ne concernent pas les installations de froid commercial et industriel. Au niveau cantonal, l'analyse de cette base de données permet les constats suivants :

- En 2009, les 911 installations répertoriées représentent une puissance thermique nominale de 272 MW_{th}. Au niveau électrique, il lui correspond une puissance nominale de 91 MW_{el} (soit 18% de la puissance de pointe au niveau du canton) et une consommation annuelle estimée à 225 GWh_{el}.
- Au niveau temporel, la situation actuelle résulte d'une croissance régulière du nombre de requêtes depuis 1980, avec une accélération dès le début des années 2000. Ainsi, sur la totalité de la période, la croissance moyenne est de 9.4 MW_{th} par an (3.9 MW_{th} par an sur la période 1980-1999, 14.1 MW_{th} par an sur la période 2000- 2009).
- La surface climatisée représente aux alentours de 1.8 million de m², soit un peu plus de 10% de la surface totale des locaux non résidentiels du canton.
- Si les datacenters ne représentent que 10% du nombre d'installations (5% de la surface climatisée), ils font par contre un peu plus d'un quart de la puissance. Etant donné leur fonctionnement en continu, essentiellement contraint par les intenses charges interne, ils représentent finalement à peu près 60% de la consommation électrique annuelle due à la climatisation ! Le solde, essentiellement dédiée à de la climatisation de confort, se répartit grosso-modo en trois tiers entre : i) les bâtiments de type administratif (banques non comprises) ; ii) banques, commerces et industrie ; iii) divers autres usages, dont une très faible part pour le résidentiel (1% au niveau des puissances).
- Au niveau de la taille des installations, seules 5% des requêtes concernent des installations de plus de 1000 kW_{th}, mais leur puissance cumulée représente plus de la moitié de la puissance concédée totale. A l'autre extrême, plus de la moitié des requêtes concernent des installations de moins de 100 kW_{th}, dont la puissance cumulée représente cependant moins de 10% de la puissance totale.

En complément, cette même étude analyse la corrélation entre la courbe de charge électrique au niveau du Canton et la température de l'air, en période estivale, afin d'en extraire la composante liée à la climatisation de confort :

- La dynamique estivale de la courbe de charge et de la température météo confirme très clairement la corrélation entre la consommation électrique et la température de l'air. La relation entre la consommation électrique (moyenne et maximum journalier) et la température (moyenne journalière) est quantifiée via la signature énergétique. Afin de s'affranchir des variations dues à la l'activité économique, celle-ci concerne exclusivement les jours ouvrables, ainsi que les mois de mai, juin, septembre.
- La signature fait clairement ressortir une corrélation de type quadratique, que deux hypothèses paraissent pouvoir expliquer : d'une part le COP des installations de climatisation qui baisse lorsque la température augmente, d'autre part un nombre croissant d'installations mises en marche lorsque la température augmente. La régression quadratique fournit les indicateurs suivants : i) La température neutre, soit la température moyenne journalière pour laquelle la consommation électrique est minimale (aux alentours de 15°C), que nous interprétons comme la température seuil à partir de laquelle la climatisation de confort est mise en marche ; ii) La puissance de base (à 15°C de moyenne journalière), soit la consommation électrique hors climatisation, ainsi que la puissance de pointe (à 30°C de

moyenne journalière), soit la consommation électrique lorsque la climatisation fonctionne à sa valeur maximale.

- Le différentiel entre la puissance de pointe (à 30°C) et la puissance de base (à 15°C) est interprétée comme la puissance électrique de la climatisation sur le Canton (hors datacenters, qui fonctionnent en ruban).
- A partir de cette analyse nous observons une puissance électrique liée à la climatisation de l'ordre actuellement de 50 à 60 MW_{el} (selon que l'analyse se fasse sur les moyennes ou les maxima journaliers), avec une tendance d'accroissement de l'ordre de 2 MW_{el} par an. Ces valeurs sont mise en relation avec les valeurs résultant de l'analyse des requêtes d'autorisation, obtenues par approche bottom-up, soustraction faite de la contribution des datacenters. On observe une très bonne cohérence entre les deux approches.

Par ailleurs, une étude par simulation numérique (Hollmuller et al., 2008) examine le potentiel, pour Genève, de diverses techniques de rafraîchissement passif intégrées au système de ventilation. Les systèmes considérés sont la ventilation nocturne, les puits canadien, le déphaseur thermique, et l'humidification adiabatique. Leur potentiel est évalué pour le cas d'un bâtiment de bureau typique, en fonction de diverses configurations constructive et opérative (protections solaires, masse thermique, isolation, gains internes), avec ou sans appui de rafraîchissement auxiliaire. Une attention particulière est donnée aux conditions météo rurale ou urbaine, ainsi qu'à des conditions estivales de type standard ou caniculaire. De façon synthétique, on en retire les conclusions suivantes :

- Dans une optique d'utilisation rationnelle de l'énergie, il est montré qu'une bonne protection solaire reste primordiale pour maintenir des conditions de confort estival acceptables. Les autres paramètres de l'enveloppe (inertie du bâtiment, accès à la masse thermique, orientation, isolation...) ne jouent un rôle qu'une fois cet aspect bien maîtrisé.
- Cela étant, si l'on veut obtenir un bon confort estival à moindre coût énergétique, il vaut mieux tendre vers un bâtiment très bien isolé. Autrement dit, et contrairement à un jugement hâtif basé sur l'intuition, il y a totale compatibilité entre les objectifs hivernaux et estivaux. Pour un bon bâtiment administratif, cela est dû à ce que la température interne pendant l'occupation est inférieure à la température extérieure, si bien que l'effet de l'isolation est alors positif. Cela peut en principe être étendu à l'habitat, dans la mesure où de nuit, lorsque le différentiel s'inverse, l'ouverture des fenêtres permet l'échange thermique adéquat.
- L'occupation des locaux joue également un rôle central pour le confort, à travers les charges internes et les apports thermiques des appareils de bureau, qu'il s'agit de maintenir aussi bas que possible. A cet égard, l'étude n'a par contre pas abordé l'effet de la gestion par les occupants des ouvrants, stores, éclairage et autres appareils, gestion qui a été supposée correcte.
- Au niveau climatique, des résultats significativement différents sont obtenus pour le même bâtiment selon que l'on considère un site urbain ou rural, un été normal ou caniculaire (type 2003). Pour un été normal et un site rural, un bâtiment efficacement protégé du soleil et des charges internes modestes (10 W/m²), un bon confort peut être garanti par simple ventilation nocturne, avec un débit d'air équivalent au débit minimal d'aération (1.3 vol/h). Dans tous les autres cas, si l'on veut strictement respecter la nouvelle norme (moins de 100h

à plus de 26.5°C), sans recourir à du rafraîchissement auxiliaire, il faut impérativement ventiler le bâtiment avec de l'air rafraîchi et un débit de ventilation accru.

- A cet égard, l'humidification adiabatique présente non seulement le plus grand potentiel, mais encore la plus grande stabilité par rapport à un été caniculaire type 2003. La quantité d'eau absorbée par l'humidification adiabatique (dans la grande majorité des cas moins de 50 litre/m² par été) reste suffisamment faible pour ne pas être un enjeu. La question de l'hygiène et de l'humidité interne du bâtiment n'a par contre pas été abordée dans cette étude.
- En complément aval à l'humidification, mais parfois également en alternative, les systèmes de stockage jour/nuit (puits canadien ou déphaseur thermique) permettent de gagner 1 à 2°C supplémentaires sur la température estivale de pointe, respectivement les quelques dizaine d'heures de confort qui manquent, cela même en situation d'été caniculaire. Cela est particulièrement le cas lorsque ces systèmes sont implantés en mode alterné avec de la ventilation nocturne directe.

Objectifs et structure de l'étude

Il est à noter que les diverses études ci-dessus concernent essentiellement la climatisation centralisée et ne tiennent ainsi pas compte de la petite climatisation portable. Dans ce contexte, la présente étude s'intéresse aux potentiels et limites de l'utilisation d'appareils portables de refroidissement.

Cette étude porte plus particulièrement sur l'évaluation in situ de l'utilisation de deux types d'appareils portables de refroidissement : des climatiseurs classiques (production de froid par machine de froid) et des rafraîchisseurs adiabatiques (production de froid par évaporation d'eau). Les appareils en question ont été installés de façon temporaire dans deux groupes de 7 bureaux chacun, situés en façade sud d'un bâtiment de l'Université de Genève, construit en 1963. Réputé pour avoir des hautes températures estivales, le bâtiment se caractérise notamment par de larges fenêtres pivotantes, formées par deux simples vitrages munies entre deux d'un store à lamelle, qui induisent un important effet de serre. L'expérience couvre la période du 4 juillet au 25 septembre 2011, dont 14 jours initiaux (phase 1) sans appareils de refroidissement, puis 60 jours (phases 2 et 3) avec appareils de refroidissement à disposition (avec échange des deux types d'appareils entre les deux groupes de bureaux entre les phases 2 et 3). Un appareillage de mesure relativement complet permet un suivi fin de la présence des usagers, de l'utilisation des appareils, des conditions hydro-thermiques au niveau des places de travail, ainsi que de l'ouverture des fenêtres.

Ce rapport est divisé en six parties. La partie 1 décrit l'étude de cas et les différents instruments utilisés. La partie 2 concerne la caractérisation intrinsèque des différents dispositifs de refroidissement. La dynamique des appareils, leur consommation électrique et leur performance sont analysées. La partie 3 caractérise les trois phases de l'expérience et analyse le fonctionnement, sur quelques jours type, de deux places de travail munies chacune d'un type d'appareil. La partie 4 concerne l'analyse statistique de l'utilisation des appareils. La partie 5 étudie le confort qui règne au sein des bureaux, par rapport aux normes existantes. Enfin, la partie 6 analyse l'aspect subjectif de l'expérience, soit l'avis des usagers recueillis grâce à des questionnaires.

PARTIE 1 Description de l'étude de cas

Cette première partie présente le bâtiment de l'étude de cas et les appareils de refroidissement utilisés. Elle expose également le plan d'expérience de ce travail de recherche et décrit les différentes mesures enregistrées.

1.1 Description du bâtiment

1.1.a Situation

L'étude des appareils portables de rafraîchissement se réalise dans des conditions réelles d'utilisation. Ces appareils sont testés par des personnes travaillant dans des bureaux du bâtiment A du site de Battelle. Ce bâtiment de trois étages est situé au 7 route de Drize à Carouge (1227, GE) et appartient à l'Université de Genève. Il a une surface brute de 6'000 m² et date de 1963. Il est possible de distinguer deux volumes formant le bâtiment A : une partie au rez-de-chaussée orientée sud-est / nord-ouest qui abrite une cafétéria, et une partie plus compacte orientée nord-est / sud-ouest qui abrite une bibliothèque et des bureaux (Figure 1-1). C'est cette dernière partie abritant les bureaux à laquelle on s'intéresse dans ce rapport. Ce bâtiment est réputé pour avoir des hautes températures intérieures en été dans les bureaux exposés au sud-ouest ce qui en fait un bon cas d'étude.



Figure 1-1 : Image satellite de l'emplacement du bâtiment A (encadré rouge) du site de Battelle¹

Remarque : parallèlement à cette étude de cas, une autre étude a été réalisée dans le bâtiment de la Fédération Internationale des Organisations des travailleurs de la Métallurgie (FIOM) situé route des Acacias à Genève. Cependant, les occupants du bâtiment de la FIOM n'ont que très peu participé à l'étude. La représentativité statistique est insuffisante et les données mesurées ne sont donc pas utilisées ici.

¹ Google Maps, 02.2013

CL 1250

C'est le plus petit des deux climatiseurs. Ses caractéristiques d'après le fournisseur³ sont :

- Puissance nominale : 1'325 W
- Puissance frigorifique : 12'000 BTU/h
- Efficacité énergétique : classe A+
- Optimal pour des pièces de 24 m²
- Poids : 29.5 kg
- Niveau de bruit : 54 db
- Dimensions (H x l x p) : 790 x 420 x 405 mm

Chacun de ces appareils dispose d'une unité interne et d'une unité externe. L'unité externe doit être placée à l'extérieur afin que le condenseur puisse rejeter sa chaleur. Les climatiseurs ont donc été placés près de l'une des fenêtres des bureaux et cette fenêtre a été scellée, comme le montre la Figure 1-3, afin d'empêcher les échanges avec l'air extérieur.

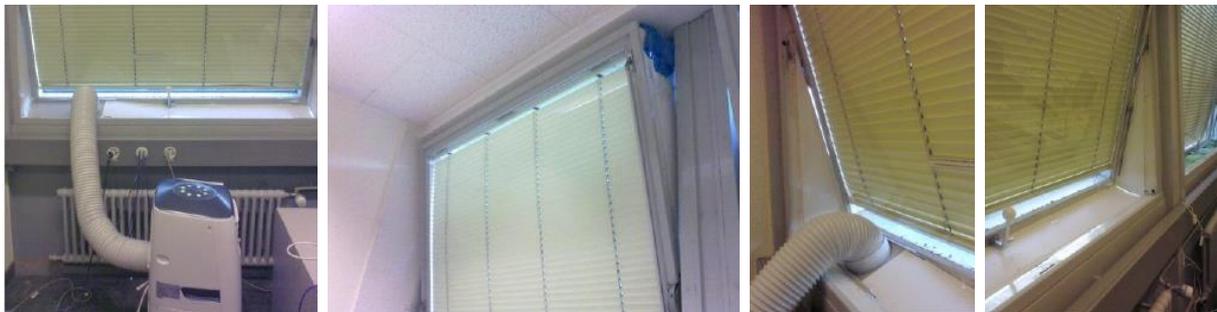


Figure 1-3 : Photos d'une fenêtre scellée quand un climatiseur classique est installé

1.2.b Les rafraîchisseurs adiabatiques (ou les rafraîchisseurs évaporatifs)

Les deux modèles de rafraîchisseurs adiabatiques portables sont le Magicool et le Mastercool du fournisseur Convair (Figure 1-4).



Figure 1-4 : Photos des rafraîchisseurs adiabatiques portables Magicool (gauche) et Mastercool (droite)

³ Site internet de Fust [en ligne] disponible sur <http://www.fust.ch/fr/nav/shop/online-shop/category/raumklimageraete/product/primotecq-cl-1250.html?cHash=a241b0c3f783091c4e82b6341c7f1210> (consulté le 20/02/2013)

Magicool

C'est le plus petit des deux dispositifs de rafraîchisseurs évaporatifs. Ses caractéristiques d'après le fournisseur⁴ sont :

- Puissance nominale : 52 W
- Puissance frigorifique : 463 W
- Optimal pour des pièces de 10-12 m²
- Réservoir d'eau de 13 L
- Poids : 7.4 kg
- Dimensions (H x l x p) : 710 x 380 x 260 mm

Mastercool

C'est le plus grand des deux dispositifs de rafraîchisseurs évaporatifs. Ses caractéristiques d'après le fournisseur⁵ sont :

- Puissance nominale : 85 W
- Puissance frigorifique : 1'148 W
- Optimal pour des pièces de 17-20 m²
- Réservoir d'eau de 15 L
- Dimensions (H x l x p) : 760 x 550 x 420 mm

Ces appareils ont été placés dans les bureaux près d'une fenêtre avec une rallonge électrique afin de permettre aux utilisateurs de les déplacer.

1.2.c Différents modes

Les quatre appareils disposent de deux modes différents, un mode refroidissement et un mode ventilation, et de trois vitesses de ventilation (v1, v2, v3). Concernant les rafraîchisseurs adiabatiques, le mode refroidissement utilise l'évaporation et consomme donc de l'eau. Pour les climatiseurs classiques, le mode refroidissement utilise le compresseur. En mode ventilation, les quatre appareils sont en fait utilisés simplement comme des ventilateurs.

1.3 Plan d'expérience

1.3.a Lieu

L'étude de cas se base sur une participation volontaire des occupants des bureaux du bâtiment A. Les appareils de climatisation classique et de rafraîchissement adiabatique ont été installés dans 14 bureaux volontaires. Les bureaux monitorés au sein du bâtiment A sont encadrés en couleurs sur les figures ci-après. Chaque chaise représente une personne et chaque carré noir un appareil de rafraîchissement. Les bureaux encadrés d'une même couleur sont les bureaux équipés du même dispositif de refroidissement au cours des différentes phases (paragraphe 1.3.b).

⁴ Site internet de convair [en ligne] disponible sur <http://convair.net.au/en-au/products/cooling/evaporative-air-coolers> (consulté le 20/02/2013)

⁵ Idem

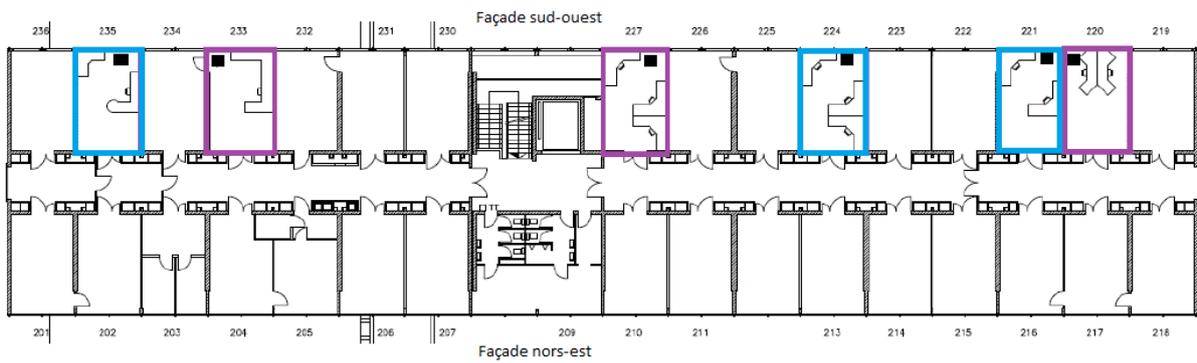


Figure 1-5 : Plan du 1er étage du bâtiment A avec les bureaux monitorés encadrés en couleurs

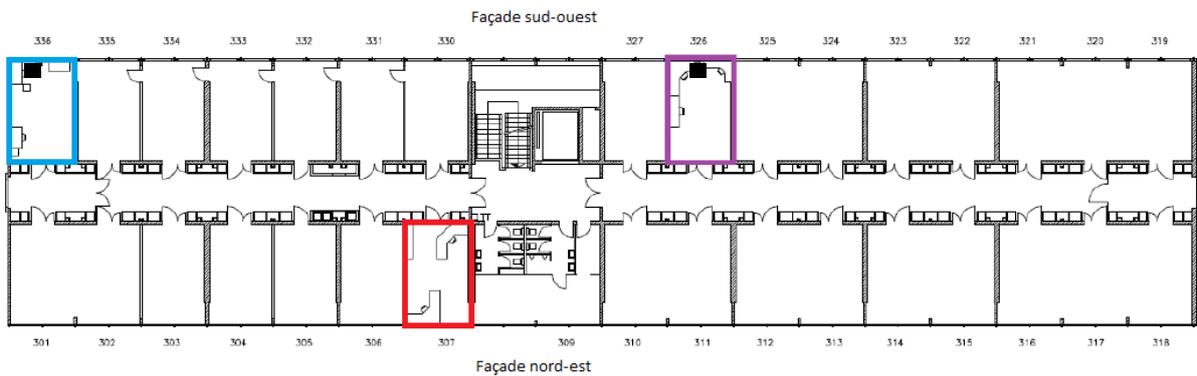


Figure 1-6 : Plan du 2ème étage du bâtiment A avec les bureaux monitorés encadrés en couleurs

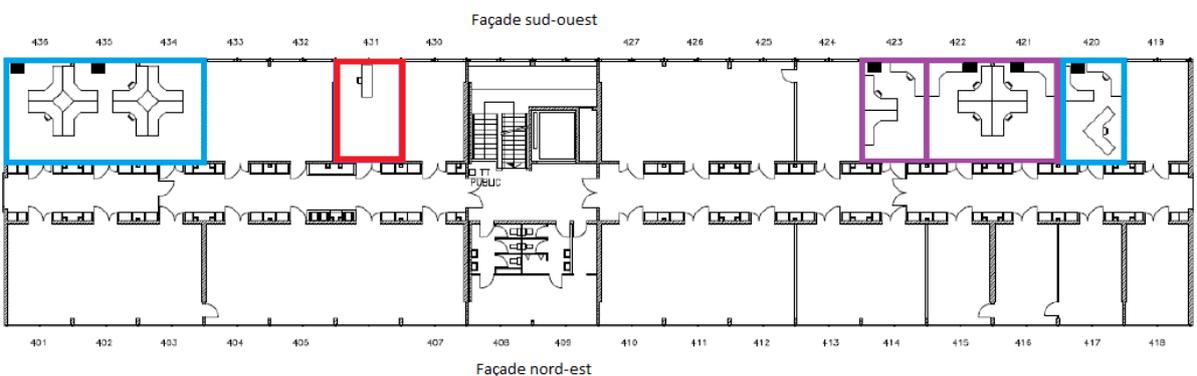


Figure 1-7 : Plan du 3ème étage du bâtiment A avec les bureaux monitorés encadrés en couleurs

Au total 14 pièces ont été monitorés :

- 2 open space (434/35/36 et 421/22),
- 10 bureaux standards (220, 221, 224, 227, 233, 235, 326, 336, 420 et 423),
- 2 bureaux standards témoins (431 et 307).

Les bureaux 431 (3^{ème} étage, façade sud-ouest) et 307 (2^{ème} étage, façade nord-est), encadrés en rouge sur les figures ci-dessus, sont des bureaux témoins qui ne disposent à aucun moment d'appareils de refroidissement mais dont les conditions intérieures sont mesurées afin de montrer le comportement normal des bureaux. Etant donné que seules la température et l'humidité relative de l'air intérieur sont mesurées dans ces bureaux et qu'il n'y a pas de sondes de présence, ces données ne seront pas utilisées par la suite.

Tous les autres bureaux monitorés sont orientés au sud-ouest. Les bureaux standards sont équipés d'un seul appareil de rafraîchissement. Les open space 421 et 434 disposent de 2 appareils chacun.

1.3.b Période

L'expérience s'est déroulée du 4 juillet 2011 au 25 septembre 2011. Cette période est divisée en 3 phases différentes :

- La phase 1 (du 4 juillet au 17 juillet) : les bureaux ne disposent d'aucun appareil de rafraîchissement.
- La phase 2 (du 18 juillet au 28 août) : la moitié des bureaux disposent d'un rafraîchisseur adiabatique (bureaux encadrés en violet sur les figures ci-avant) et l'autre moitié d'un climatiseur classique (bureaux encadrés en bleu sur les figures ci-avant).
- La phase 3 (du 29 août au 25 septembre) : il y a un échange des appareils, les bureaux qui avaient un rafraîchisseur adiabatique dans la phase 2 ont maintenant un climatiseur classique, et vice-versa.

La liste des appareils utilisés dans les différents bureaux en fonction des phases est présentée en Annexe 1.

Un petit mode d'emploi a été donné aux usagers pour chaque appareil de refroidissement mis à disposition. Ces modes d'emploi sont visibles en Annexe 2 et Annexe 3. Il est en particulier conseillé d'utiliser le climatiseur classique avec les fenêtres fermées (pour ne pas laisser entrer l'air chaud), et le rafraîchisseur adiabatique avec les fenêtres ouvertes (pour laisser s'échapper l'air humide).

1.4 Acquisition des mesures

1.4.a Mesures enregistrées

Les données mesurées sont enregistrées à l'aide de data logger de type onset HOBO U12 par pas de temps de 2 minutes. Nous effectuons ensuite des moyennes par 10 minutes.

Les mesures météorologiques enregistrées sont :

- la température de l'air extérieur,
- l'humidité relative de l'air extérieur.

Les mesures enregistrées au niveau des places de travail sont :

- la température de l'air,
- l'humidité relative de l'air,
- la présence de l'utilisateur.

Les mesures enregistrées au niveau des fenêtres sont :

- la température des vitrages,
- l'état de la fenêtre (ouverte ou fermée).

Les mesures enregistrées au niveau des appareils de refroidissement sont :

- la consommation électrique,
- la température de l'air à la sortie de l'appareil,
- l'humidité relative de l'air à la sortie de l'appareil,
- la température de l'air à l'entrée de l'appareil (uniquement pour les rafraîchisseurs adiabatiques).

Il s'agit au total de 162 sondes de mesures, dont la dénomination est donnée en Annexe 4.

1.4.b Description des systèmes de mesures

Les appareils utilisés pour effectuer les mesures enregistrées sont récapitulés succinctement dans le Tableau 1-1, et détaillés par la suite.

Tableau 1-1 : Appareils utilisés pour effectuer les mesures enregistrées

Nom	Mesure	Unité	Appareil	Fournisseur	Modèle
T	Température	°C	Sonde de température	Onset	HOBO U12 TMC20-HD
Hr	Humidité relative	%	Sonde d'humidité	Onset	HOBO U12
Ud	Présence	V	Capteur pyroélectrique	SURE electronics	Pyroelectric Infrared PIR Motion
C	Courant	A	Capteur de courant	Onset	CTV-C
Uw	Fenêtre fermée/ouverte	V	Détecteur d'ouverture	ABUS	FU7350W

Mesures météorologiques

La température et l'humidité relative de l'air extérieur sont obtenues à partir des relevés de la station météo de Battelle disponibles en ligne sur le site internet du groupe Energie de l'Université de Genève : <http://www.unige.ch/energie/forel/energie/activites/data-num.html>

Mesures de température

Pour mesurer les différentes températures, deux sortes de sondes sont utilisées : la sonde TMC20-HD ou la sonde directement incluse dans le data logger HOBO U12, visibles sur la Figure 1-8.



Figure 1-8 : Photos de la sonde TMC20-HD (gauche) et du HOBO U12 (droite).

La sonde TMV20-HD est utilisée pour mesurer la température des vitrages et la température à l'entrée du rafraîchisseur adiabatique. Concernant la température des vitrages, la sonde est collée à la vitre avec un ruban adhésif en aluminium (Figure 1-9) ce qui permet de limiter le chauffage de la sonde par les rayonnements provenant de l'intérieur de la pièce. Pour la température à l'entrée du rafraîchisseur adiabatique, la sonde est placée dans une entrée d'air et fixée par un ruban adhésif transparent (Figure 1-10).



Figure 1-9 : Photo de la sonde TMC20-HD installée pour mesurer la température du vitrage



Figure 1-10 : Photo de la sonde TMC20-HD installée pour mesurer la température à l'entrée du rafraîchisseur adiabatique

La sonde de température à l'intérieur du HOBO U12 est utilisée pour mesurer la température de l'air de la pièce et la température à la sortie des appareils de refroidissement. Le HOBO est placé sur le bureau en dessous des écrans d'ordinateurs pour mesurer la température de l'air de la pièce (Figure 1-11) et il est directement accroché sur les appareils pour mesurer la température de sortie de l'air (Figure 1-12).



Figure 1-11 : Photo du HOBO U12 installé pour mesuré la température de l'air de la pièce



Figure 1-12 : Photo du HOBO U12 installé pour mesuré la température de l'air à la sortie des appareils

Mesures d'humidité relative

Les mesures d'humidité relative de l'air de la pièce et de l'air à la sortie des appareils de refroidissement se font grâce à la sonde d'humidité directement intégrée dans le HOBO U12 (Figure 1-8) et exactement de la même façon que les mesures de températures faites avec le même appareil et décrites ci-dessus (Figure 1-11 et Figure 1-12).

Mesures de présence

La présence des usagers dans les bureaux nous donne beaucoup d'informations utiles notamment sur leurs habitudes et leur comportement. Pour déterminer si l'utilisateur est présent ou absent, un capteur pyroélectrique à infrarouges de SURE electronics est placé sur les bureaux en face de la personne (Figure 1-13).



Figure 1-13 : Photos du capteur pyroélectrique à infrarouges placé sur un bureau

Les mesures de présences sont enregistrées en Volts. La personne est présente si la mesure est supérieure à 0.5 V, sinon elle est absente.

Mesures de l'état des fenêtres (ouvertes/fermées)

Savoir si les fenêtres sont ouvertes ou fermées nous permet d'observer le comportement des usagers, c'est-à-dire de voir s'ils utilisent la ventilation nocturne et comment ils utilisent les appareils de rafraîchissement mis à leur disposition. Le détecteur d'ouverture utilisé pour effectuer ces mesures est un FU7350W de ABUS (Figure 1-14)



Figure 1-14 : Photo du capteur FU7350W (gauche) et photo du capteur mis en place sur la fenêtre (droite)

Les mesures de l'état des fenêtres sont enregistrées en Volts. La fenêtre est ouverte si la mesure est inférieure à 0.5 V, sinon elle est fermée.

Mesures du courant électrique

Le courant électrique consommé par les appareils de rafraîchissement est mesuré avec un capteur de courant du type CTV-C. Nous faisons deux spirales avec le fil neutre ce qui double le courant mesuré et nous permet d'obtenir des valeurs plus précises (Figure 1-15).



Figure 1-15 : Photo du capteur de courant CTV-C mesurant un courant double

Cet appareil a un fond d'échelle de 100 A et ne permet donc pas d'être précis sur des mesures de faible courant. Les climatiseurs portables classiques consomment quelques ampères et l'appareil mesure donc une valeur correcte. Au contraire, les rafraîchisseurs adiabatiques portables consomment un courant inférieur à 1 A. Ce capteur de courant ne permet donc pas de faire des mesures correctes de leur consommation. Nous avons donc effectué une nouvelle mesure à posteriori de la consommation des rafraîchisseurs adiabatiques, mais cette fois de façon ponctuelle, avec une pince ampèremétrique qui a un fond d'échelle de 10 A et qui est donc plus précise pour des faibles courants.

1.5 Questionnaires

En plus des mesures enregistrées décrites ci-avant, l'avis des usagers est également pris en compte. En effet, des questionnaires sont remplis tout au long de l'expérience par les usagers afin d'évaluer leur confort et leur satisfaction.

Un premier questionnaire est complété à la fin de la phase 1 afin de déterminer le confort de l'utilisateur sans utiliser d'appareil de refroidissement (Annexe 5). Les usagers évaluent, sur une échelle de 1 à 7, la température et la qualité de l'air de leur bureau sur différents critères.

Un autre questionnaire est rempli tout à la fin de l'étude (Annexe 6) et nous renseigne sur l'opinion qu'ont les gens des deux appareils testés et de la climatisation en général. Ce questionnaire final est divisé en cinq parties. La première partie renseigne de façon générale sur la personne qui remplit le questionnaire. La seconde partie se base sur les conditions avant l'étude. La troisième partie concerne le climatiseur classique et la quatrième partie le rafraîchisseur adiabatique. Les usagers évaluent de la même manière que dans le premier questionnaire, sur une échelle de 1 à 7, la

température et la qualité de l'air, ainsi que la rapidité de l'effet et le niveau de bruit dans leur bureau pendant l'utilisation de chacun des appareils. La cinquième et dernière partie regroupe des questions sur la climatisation en général.

De plus, tout au long de l'étude, les usagers complètent une fiche, à cinq moments différents de la journée (arrivée, matin, déjeuné, après-midi, départ), pour indiquer comment ils se sentent et comment ils aimeraient se sentir (Annexe 7). L'échelle des ressentis utilisée est l'échelle de sensation thermique utilisée par l'ASHRAE⁶ et reprise par la suite par Fanger (1970). Elle se compose de sept points allant de -3 à +3 :

- -3 très froid,
- -2 froid,
- -1 frais
- 0 agréable, neutre (ni chaud ni froid),
- +1 légèrement chaud,
- +2 chaud,
- +3 très chaud.

⁶ American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

PARTIE 2 Caractérisation des dispositifs de rafraîchissement

Deux autres expériences sont menées, en parallèle de celle dans les bureaux du bâtiment A décrite dans la Partie 1, afin de caractériser le fonctionnement des différents dispositifs de rafraîchissement. Pour cela, les quatre appareils sont placés ensemble dans un bureau vide. La première expérience a pour but d'évaluer les débits et les vitesses d'air pour chacun des appareils et la seconde analyse leurs caractéristiques thermiques et énergétiques. Cette deuxième partie décrit donc la réalisation de ces deux expériences et présente les résultats qui en ressortent.

2.1 Débits et vitesses d'air

2.1.a Description de l'expérience

La vitesse de l'air en sortie des appareils a été mesurée grâce à l'anémomètre compact testo 425 pour les quatre appareils de refroidissement et pour les trois vitesses de ventilation. Afin d'avoir des valeurs de vitesses d'air dans un cône d'air que forme l'appareil, ces mesures ont été effectuées à des distances de 0,5, 1 et 2 mètres des appareils de rafraîchissement et à des angles de 0°, 10°, 20°, 30° et 40° comme expliqué dans la Figure 2-1.

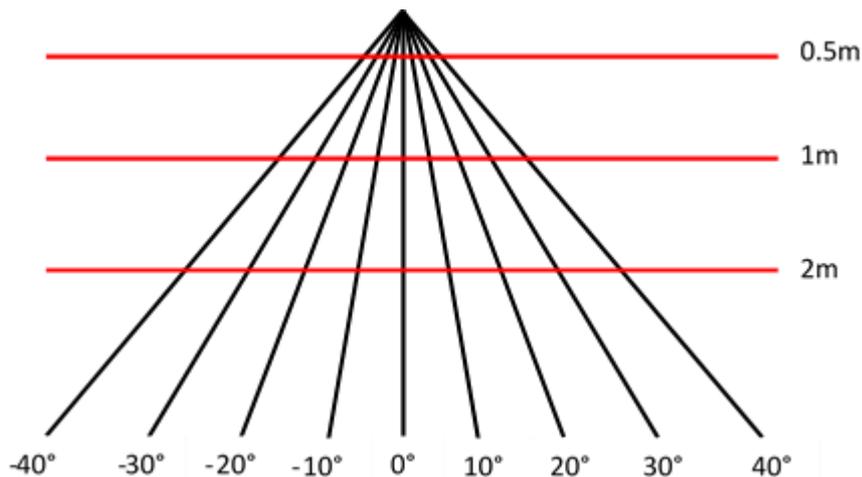


Figure 2-1 : Schéma des mesures de vitesses d'air effectuées
Remarque : Chaque intersection entre deux lignes représente une valeur

Afin de connaître la vitesse de l'air directement à la sortie des appareils (à 0 mètre), des mesures de vitesses ont été faites sur un quadrillage de la grille de ventilation et nous avons calculé une moyenne de ces vitesses pour chacun des appareils. Mise en relation avec la section de la grille de ventilation, la vitesse moyenne donne le débit d'air de l'appareil. Les valeurs des surfaces et des vitesses moyennes sont présentées en Annexe 8.

2.1.b Débits d'air

Les débits d'air calculés pour chaque appareil de refroidissement et pour les trois vitesses de ventilation sont présentés dans le Tableau 2-1.

Tableau 2-1 : Débits d'air de chaque appareil de refroidissement en fonction de la vitesse de ventilation

	Vitesse de ventilation	CL 550 SPLIT	CL 1250 MONO	MAGICOOOL	MASTERCPOOL
Débit (m³/10min)	v1	44.99	41.76	93.22	99.95
	v2	45.50	55.62	97.95	133.45
	v3	51.94	77.42	138.97	156.78

De façon générale, les rafraîchisseurs adiabatiques (Magicool et Mastercool) ont un débit d'air plus important que les climatiseurs classiques (CL 550 et CL 1250).

Le débit d'air du CL 550 en vitesse 1 est équivalent au débit en vitesse 2. Le CL 1250 a quant à lui un débit plus faible en vitesse 1 qu'en vitesse 2. Dans les deux cas, le débit d'air est nettement plus élevé en vitesse de ventilation 3.

De la même manière, plus la vitesse de ventilation des rafraîchisseurs adiabatiques est grande, plus le débit d'air est important. La différence de débit entre les vitesses 1 et 2 est plus élevée dans le cas du Mastercool que dans le cas du Magicool.

2.1.a Vitesses d'air

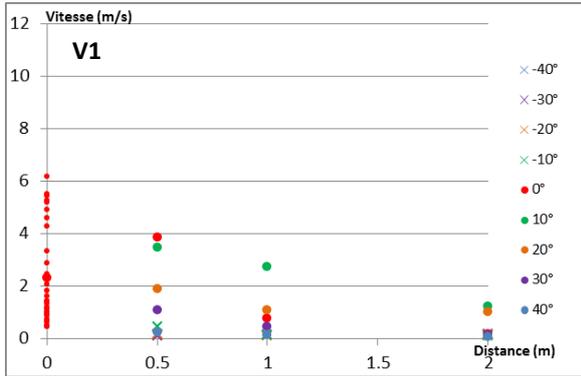
Les vitesses d'air pour les trois différentes vitesses de ventilation en fonction de la distance à l'appareil et de l'angle considéré sont présentées sur la Figure 2-2 pour les climatiseurs classiques CL 1250 et CL 550 et sur la Figure 2-3 pour les rafraîchisseurs adiabatiques Magicool et Mastercool.

La vitesse d'air en sortie des climatiseurs classiques peut monter jusqu'à 12 m/s. Quelle que soit la vitesse de ventilation, la vitesse d'air diminue avec la distance à l'appareil mais également avec l'angle. En effet, la vitesse d'air est plus faible à 2 m qu'à 0.5 m et elle est quasiment nulle pour des angles de 40° ou -40° alors qu'elle est maximale pour des angles de 0°, 10° ou -10°.

On remarque d'après la Figure 2-2 une dissymétrie des vitesses entre la droite et la gauche des climatiseurs. En effet, concernant le CL 550, les vitesses de l'air entre 0° et -40° sont supérieures à celles entre 0° et 40°. Inversement pour le CL 1250, les vitesses de l'air entre 0° et 40° sont supérieures à celles entre 0° et -40°. Ces dissymétries sont confirmées, bien qu'inversées, par les vitesses mesurées directement vers les grilles de ventilation et peuvent être expliquées par la forme de l'appareil (Annexe 9 et Annexe 10).

La vitesse d'air en sortie des rafraîchisseurs adiabatiques peut monter jusqu'à 6 m/s mais est généralement inférieure à 3 m/s. Quelle que soit la vitesse de ventilation, la vitesse d'air diminue avec la distance à l'appareil mais également avec l'angle. En effet, la vitesse d'air est plus faible à 2 m qu'à 0.5 m et elle est quasiment nulle pour des angles de 30°, 40°, -30° et -40° alors qu'elle est maximale pour des angles de 0°, 10° et -10°. Il est possible de constater d'après la Figure 2-3 une certaine symétrie des vitesses d'air entre la droite et la gauche des rafraîchisseurs évaporatifs. Cependant, la vitesse de l'air au centre de la grille de ventilation est inférieure à celle sur les côtés de la grille et il existe ainsi une certaine hétérogénéité des vitesses d'air (Annexe 11 et Annexe 12).

CL 1250



CL 550

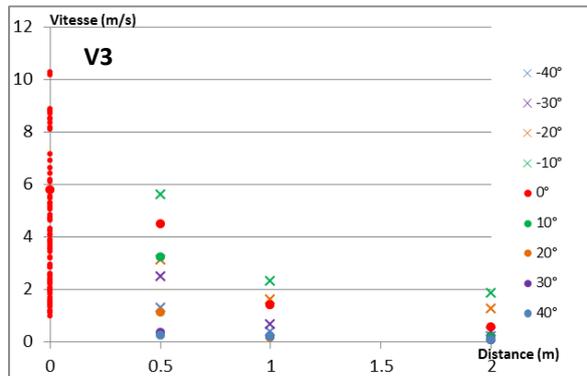
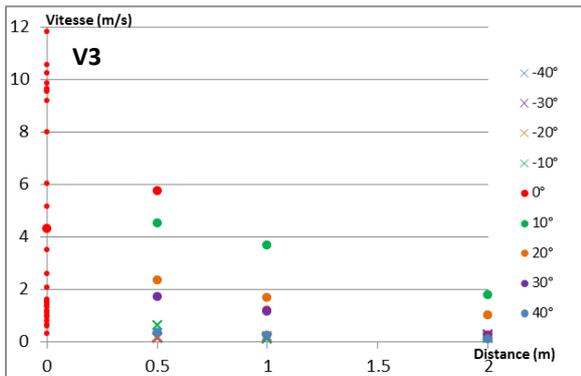
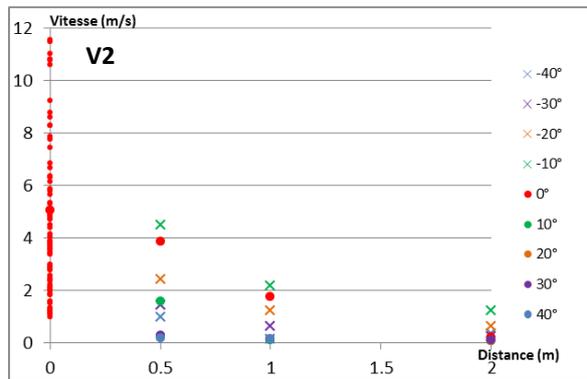
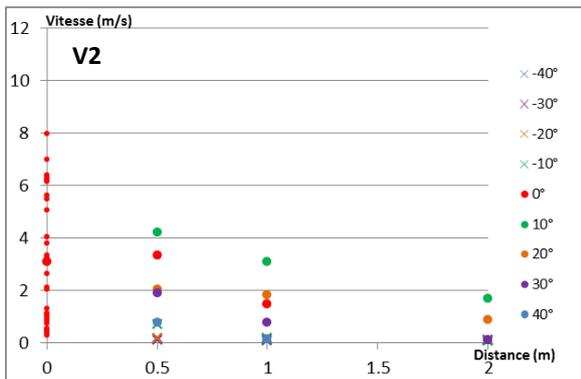
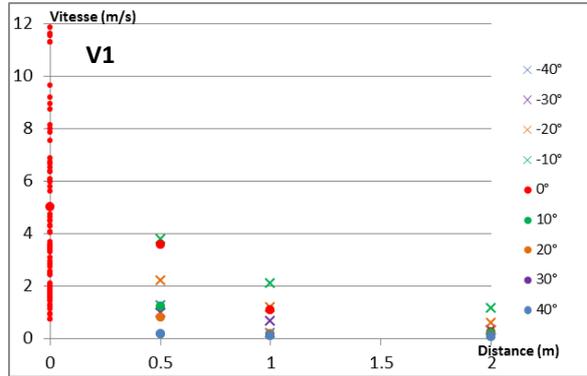
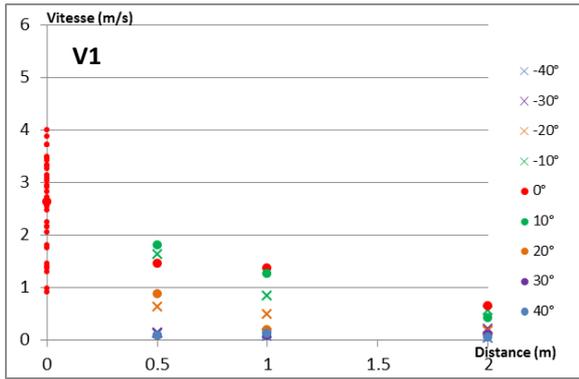


Figure 2-2 : Vitesses d'air du CL 1250 (gauche) et du CL 550 (droite) en fonction de la distance à l'appareil et de l'angle considéré pour les vitesses de ventilation 1 (haut), 2 (milieu) et 3 (bas)

MAGICOOL



MASTERCool

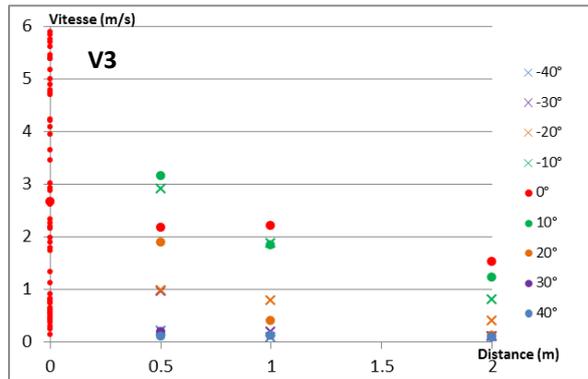
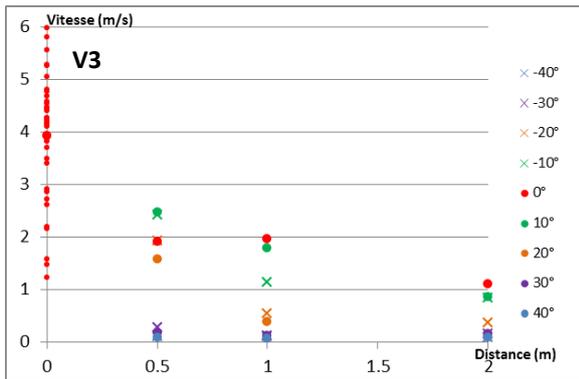
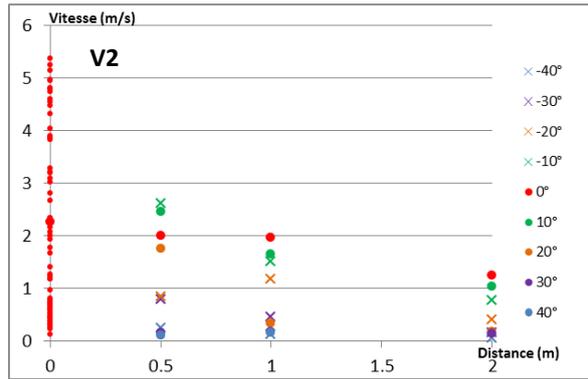
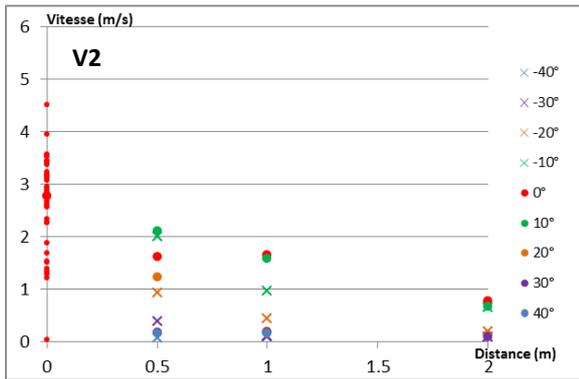
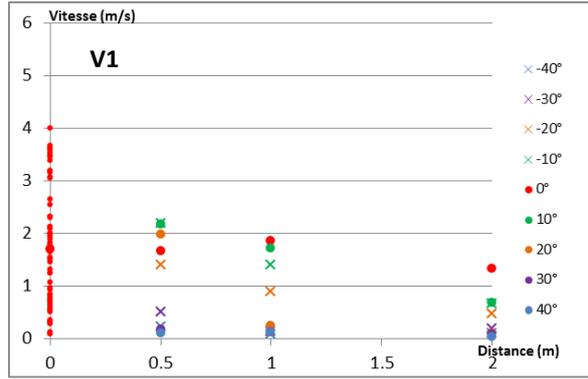


Figure 2-3 : Vitesses d'air du Magicool (gauche) et du Mastercool (droite) en fonction de la distance à l'appareil et de l'angle considéré pour les vitesses de ventilation 1 (haut), 2 (milieu) et 3 (bas)

2.2 Caractéristiques thermiques et énergétiques

2.2.a Description de l'expérience

Durant cette expérience, les quatre appareils sont rassemblés dans une seule et même pièce et fonctionnent en continu pendant une semaine. Au cours de cette semaine, les vitesses de ventilation et les modes (refroidissement ou ventilation) sont changés régulièrement et des mesures sont enregistrées toutes les minutes.

Les mesures enregistrées pour chaque appareil sont :

- les températures d'entrée et de sortie,
- les humidités relatives d'entrée et de sortie,
- le courant consommé.

Ces mesures sont effectuées de la même manière qu'expliquée au paragraphe 1.4.b. Elles sont donc enregistrées pour les trois vitesses en mode refroidissement, pour les trois vitesses en mode ventilateur, et ce, pour tous les appareils. Des moyennes par 10 minutes sont ensuite calculées. Les calculs effectués sur ces mesures et présentés par la suite sont expliqués en Annexe 13.

2.2.b Les climatiseurs classiques

Dynamique

La Figure 2-4 et la Figure 2-5 présentent l'évolution au fil de la semaine des températures et des humidités relatives à l'entrée et à la sortie des appareils de climatisation, la différence de température entre l'entrée et la sortie et la consommation de courant, respectivement pour le CL 550 et le CL 1250. Les différentes vitesses de ventilation sont indiquées par v_1 , v_2 et v_3 . Le mode refroidissement est indiqué par ON et le mode ventilation par OFF.

Lorsque les appareils sont en mode ventilation, la température et l'humidité relative à l'entrée des appareils sont égales à la température et l'humidité relative à la sortie des appareils. En mode refroidissement, la température à la sortie des appareils, comprise entre 5°C et 15°C, est plus faible et plus stable que la température d'entrée. Dès lors, l'humidité relative à la sortie des appareils est plus élevée et logiquement plus stable que celle à l'entrée. Le CL 550 a une humidité relative à la sortie qui se situe entre 75% et 90%, alors que pour le CL 1250 elle est comprise entre 80% et 95%.

La différence de température entre l'entrée et la sortie des appareils est nulle en mode ventilation. En mode refroidissement, la différence de température est comprise entre 8°C et 16°C pour le CL 550 et entre 10°C et 17°C pour le CL 1250. Dans les deux cas, la différence de température en vitesse de ventilation 1 (la plus faible) est plus importante que pour les vitesses de ventilation plus élevées.

Dans les deux cas, la consommation de courant en mode ventilation est très faible, aux alentours de 0.5 A, alors qu'en mode refroidissement elle se situe plutôt entre 4 et 6 A. La consommation de courant du CL 1250 est plus élevée que celle du CL 550.

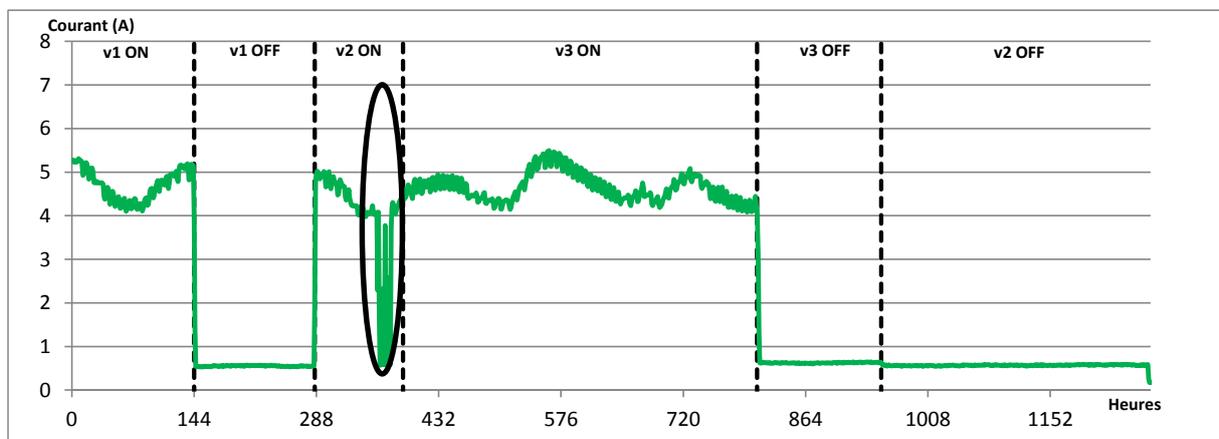
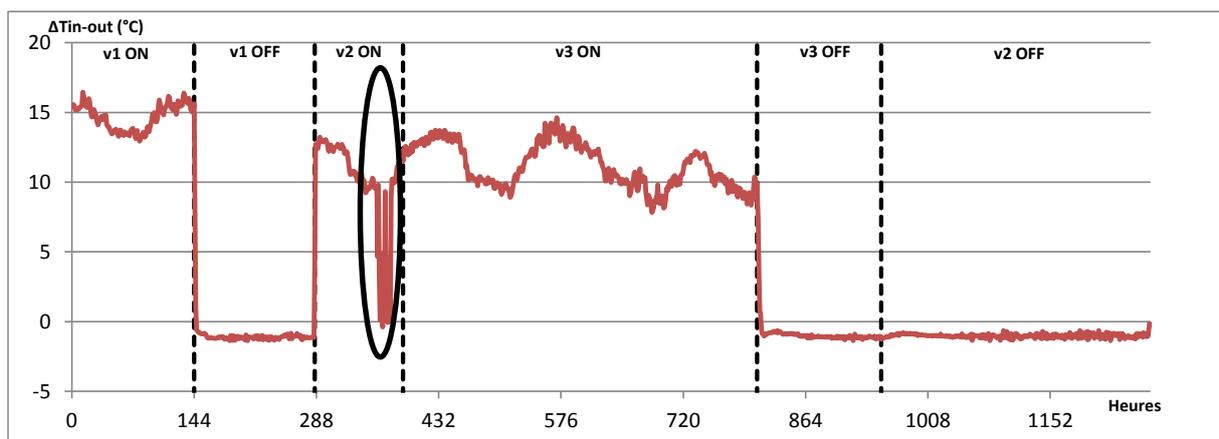
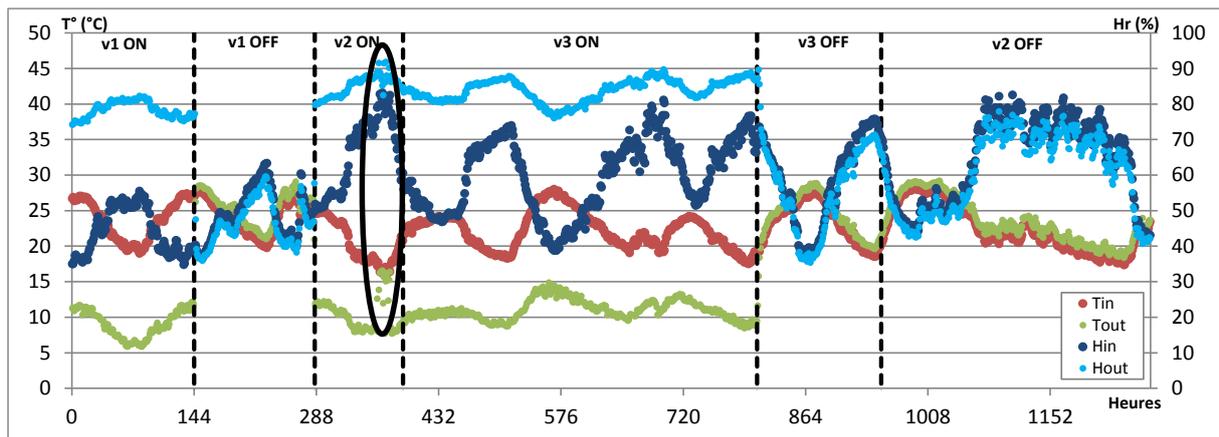


Figure 2-4 : Dynamique du fonctionnement du climatiseur CL 550. Températures d'entrée (T_{in}), de sortie (T_{out}) et humidités relatives à l'entrée (H_{in}) et à la sortie (H_{out}) (haut) ; Différence de température entre l'entrée et la sortie (milieu) ; Consommation de courant (bas)

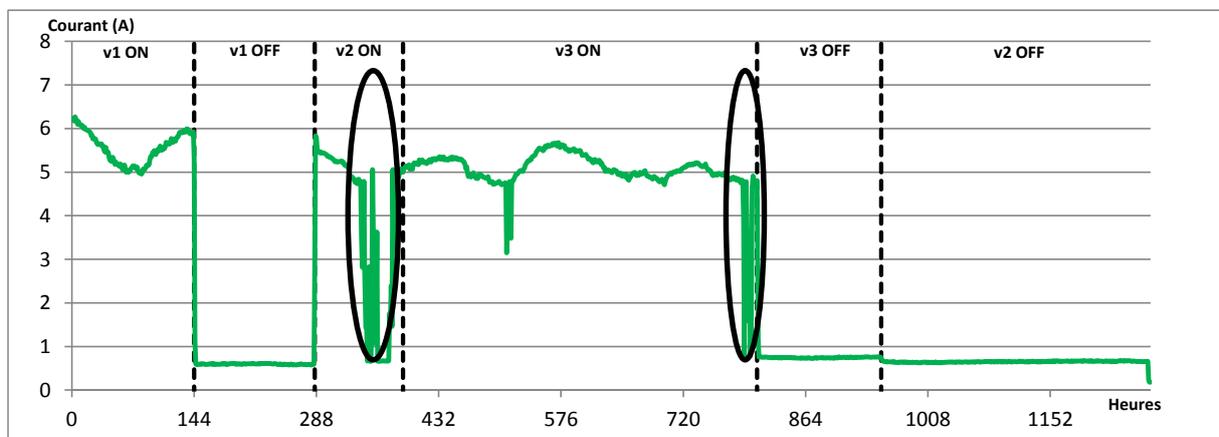
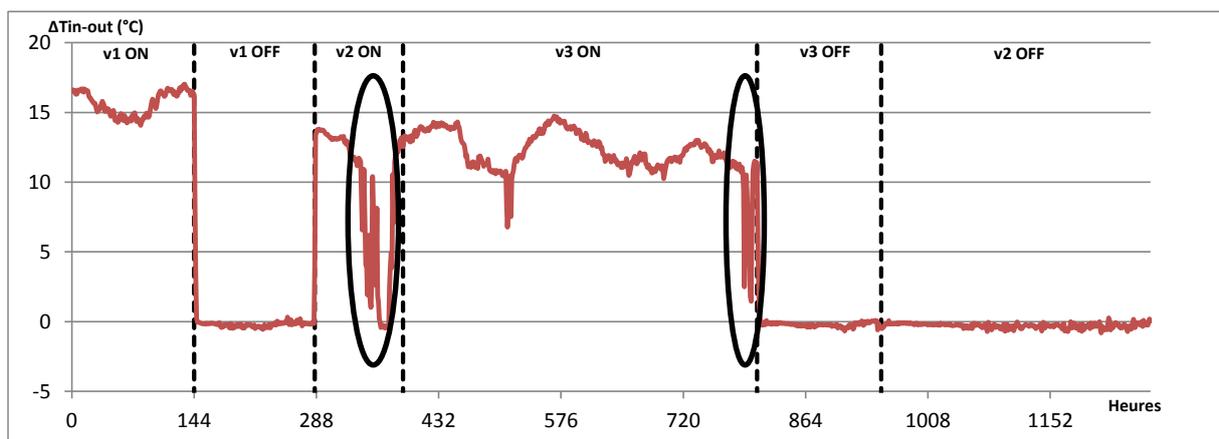
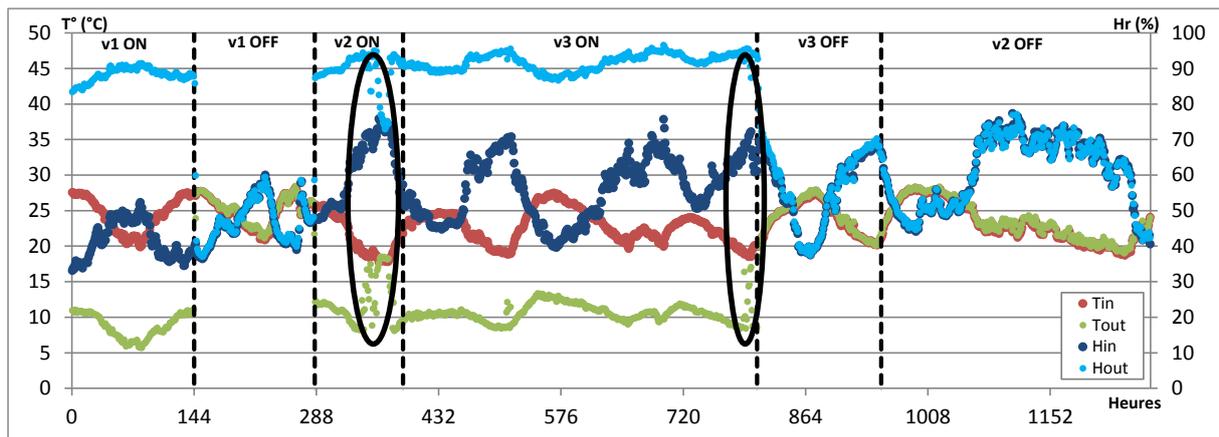


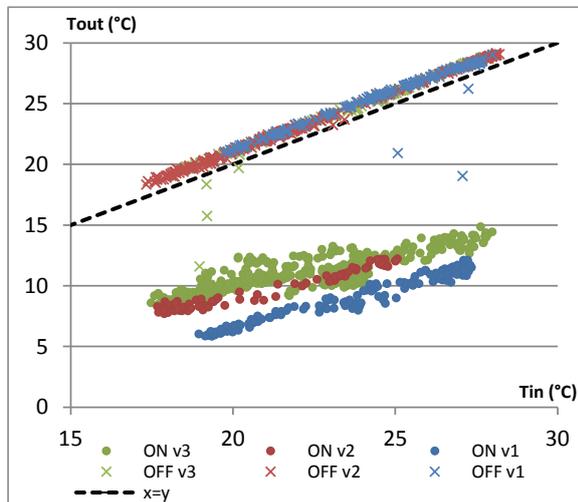
Figure 2-5 : Dynamique du fonctionnement du climatiseur CL 1250. Températures d'entrée (T_{in}), de sortie (T_{out}) et humidités relatives à l'entrée (H_{in}) et à la sortie (H_{out}) (haut) ; Différence de température entre l'entrée et la sortie (milieu) ; Consommation de courant (bas)

Ces résultats sont analysés de façon plus précise dans les graphiques suivants. Nous supposons que les points entourés en noir dans la Figure 2-4 et la Figure 2-5 sont des valeurs mesurées pendant des périodes où les appareils s'éteignent automatiquement car la température à l'entrée des appareils atteint la limite inférieure de température réglée à 18°C , raison pour laquelle ils ne sont pas pris en compte dans les analyses suivantes.

Température de sortie (Tout)

La Figure 2-6 présente la température en sortie des appareils CL 550 et CL 1250 en mode refroidissement (ON) et en mode ventilation (OFF) pour les trois différentes vitesses de ventilation en fonction de la température en entrée.

CL 550



CL 1250

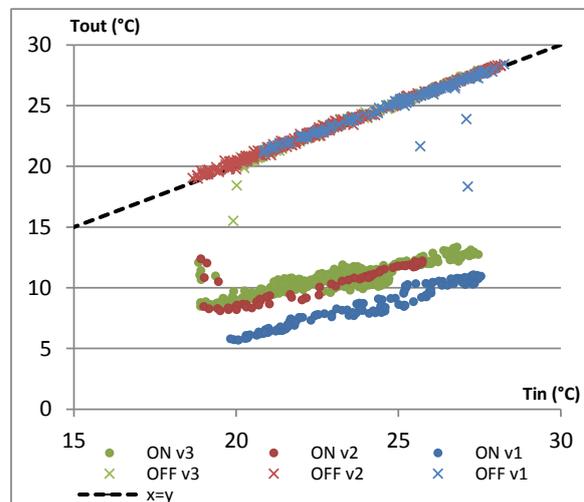


Figure 2-6 : Température de sortie (Tout) en fonction de la température d'entrée (Tin) en mode refroidissement (ON) et en mode ventilation (OFF) pour le CL 550 (gauche) et le CL 1250 (droite)

Il est tout d'abord remarquable que les deux climatiseurs classiques portables ont un comportement similaire.

Comme vu précédemment, en mode ventilation, la température de sortie des appareils est égale à la température d'entrée. En effet, les droites se superposent à la droite en pointillés noirs qui est la fonction linéaire $x=y$.

En mode refroidissement, la température de sortie des climatiseurs est comprise entre 5°C et 15°C et augmente légèrement avec la température d'entrée. La température de sortie en vitesse de ventilation 1 est plus faible que pour les deux autres vitesses de ventilation plus rapides (v2 et v3). Ce phénomène s'explique par le fait que le débit d'air en vitesse 1 est moins important que pour les autres vitesses et l'air a donc plus le temps d'être refroidi. Cela permet également d'expliquer le ΔT_{in-out} plus important pour la vitesse 1 qui a été vu au paragraphe précédent.

Puissance électrique

La Figure 2-7 présente la puissance électrique des appareils CL 550 et CL 1250 en mode refroidissement (ON) et en mode ventilation (OFF) pour les trois différentes vitesses de ventilation en fonction de la température en entrée.

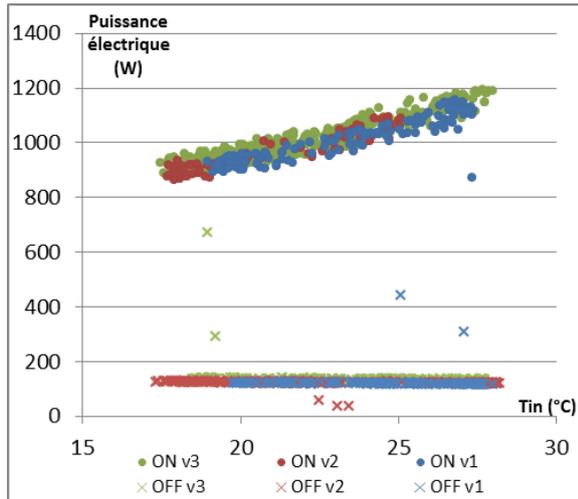
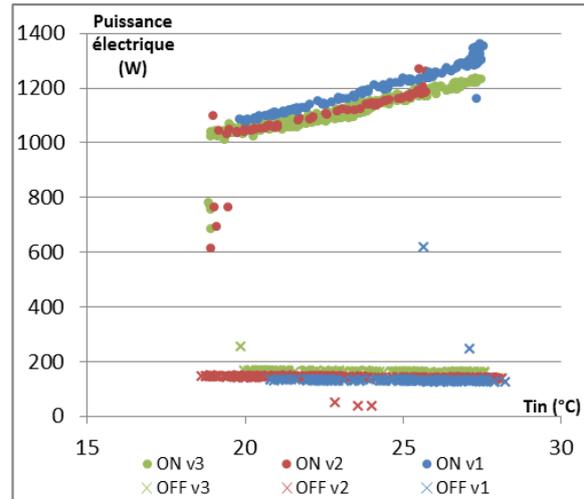
CL 550**CL 1250**

Figure 2-7 : Puissance électrique en fonction de la température d'entrée (T_{in}) en mode refroidissement (ON) et en mode ventilation (OFF) pour le CL 550 (gauche) et le CL 1250 (droite)

Les deux appareils ont des puissances électriques similaires. En mode ventilateur, la puissance électrique des climatiseurs est faible, entre 130 W et 170 W, et n'augmente pas avec la température d'entrée, quelle que soit la vitesse de ventilation.

Au contraire, la puissance électrique augmente fortement en mode refroidissement, entre 800 W et 1400 W, et augmente également avec la température d'entrée. Il n'existe pas de différences flagrantes entre les différentes vitesses de ventilation. Cependant, le CL 1250 a des puissances électriques supérieures à celles du CL 550.

Puissance frigorifique

La Figure 2-8 présente la puissance frigorifique des appareils CL 550 et CL 1250 en mode refroidissement (ON) pour les trois vitesses de ventilation en fonction de la température d'entrée.

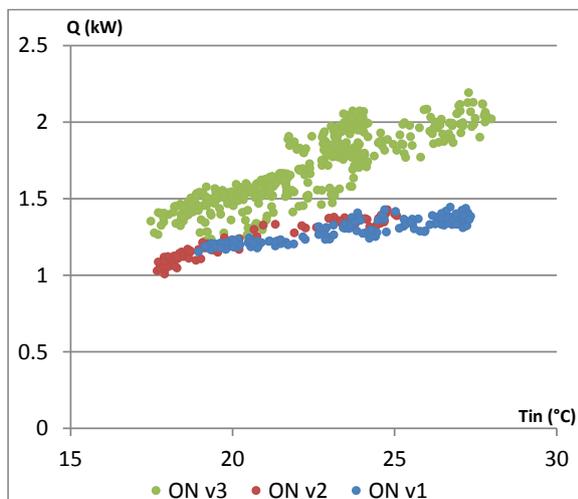
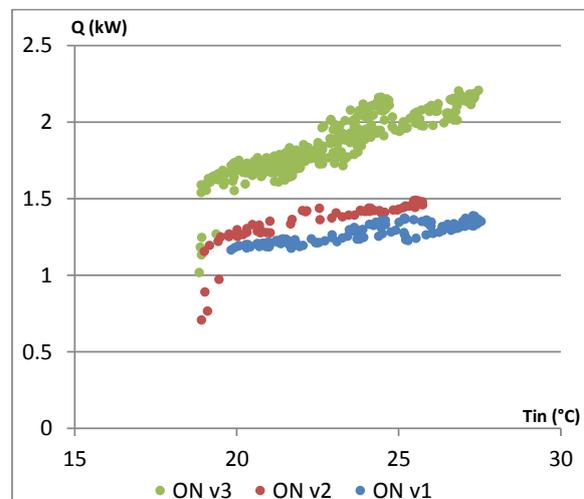
CL 550**CL 1250**

Figure 2-8 : Puissance frigorifique en fonction de la température d'entrée (T_{in}) en mode refroidissement (ON) pour le CL 550 (gauche) et le CL 1250 (droite)

Une fois encore les deux appareils ont des puissances frigorifiques similaires, qui augmentent avec la température d'entrée. La puissance frigorifique en vitesse de ventilation 3, comprise entre 1.3 kW et 2.2 kW, est supérieure à celle des deux autres vitesses 1 et 2. Cela s'explique par un débit d'air beaucoup plus important dans le cas de la vitesse de ventilation 3 (Tableau 2-1, p.22). La puissance du CL 550 est équivalente en vitesse 1 et en vitesse 2, comprise entre 1 kW et 1.5 kW, car les débits d'air de ces deux vitesses sont très proches. Les débits d'air des vitesses 1 et 2 du CL 1250 sont proches mais avec une plus grande différence que dans le cas du CL 550, ce qui permet d'expliquer la légère différence de puissance entre les deux vitesses 1 et 2.

Energy Efficiency Rating (EER)

La Figure 2-9 présente le rapport d'efficacité énergétique (EER) des appareils CL 550 et CL 1250 en mode refroidissement (ON) pour les trois vitesses de ventilation en fonction de la différence de température entre l'entrée et la sortie des appareils.

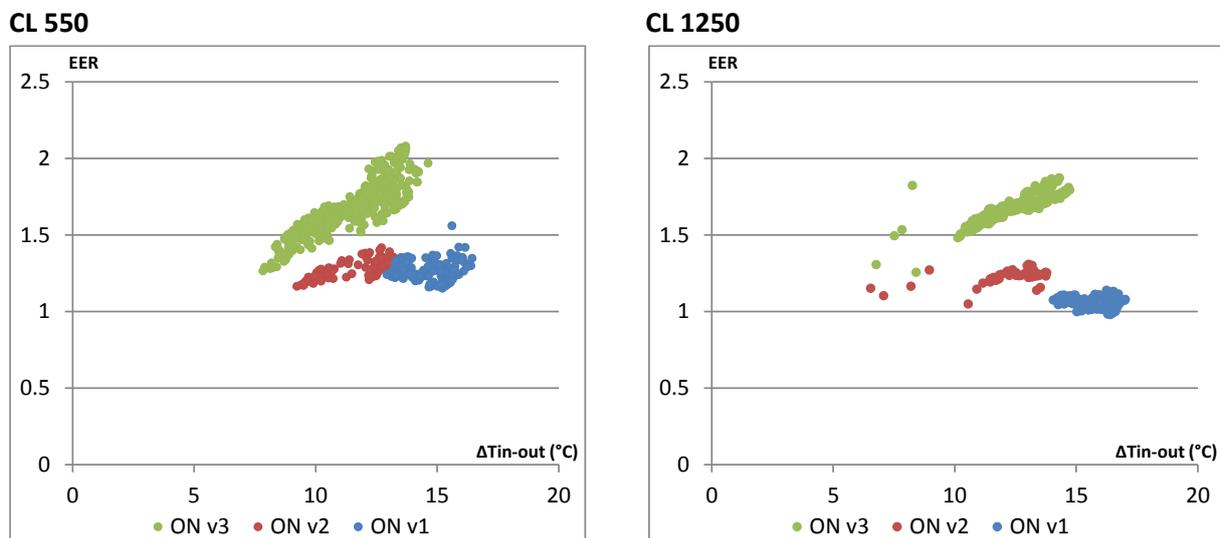


Figure 2-9 : EER en fonction de la différence de température entre l'entrée et la sortie (ΔT_{in-out}) des appareils en mode refroidissement (ON) pour le CL 550 (gauche) et le CL 1250 (droite)

Les différentes vitesses de ventilation ayant quasiment une même puissance électrique, les EER dépendent principalement de la puissance frigorifique. La vitesse de ventilation 3 présente le meilleur EER avec des valeurs comprises entre 1.3 et 2.1 pour le CL 550 et entre 1.5 et 1.8 pour le CL 1250. Les vitesses de ventilation 1 et 2 du CL 550 ont un EER compris entre 1.2 et 1.4. Le CL 1250 présente des EER plutôt stables pour les vitesses de ventilation 1 et 2 respectivement d'environ 1.1 et 1.2. Ce sont des performances plutôt modestes comparées aux EER moyens en Europe. En effet, l'EER moyen est de 2.5 pour les appareils de type split (comme le CL 550), et de 2.1 pour les appareils de type single-duct (comme le CL 1250) (EERAC, 1999).

Données constructeur

Le Tableau 2-2 présente la puissance nominale et la puissance frigorifique données par le constructeur, l'EER déduit, ainsi que la puissance électrique, la puissance frigorifique et l'EER obtenus à partir de nos mesures pour le CL 550 et le CL 1250.

	CL 550	CL 1250
Puissance nominale constructeur (kW)	1.2	1.3
Puissance électrique mesurée (kW)	0.87 – 1.2	0.98 – 1.3
Puissance frigorifique constructeur (kW)	3.5	3.5
Puissance frigorifique mesurée (kW)	1 – 2.1	1 – 2.2
EER constructeur	2.9	2.7
EER mesuré	1.3 – 2.1	1.1 – 1.8

Tableau 2-2 : Puissances nominales, puissances frigorifiques et EER du CL 550 et du CL 1250 donnés par le constructeur et obtenus par nos mesures

La puissance électrique mesurée est équivalente à la puissance nominale fournie par le constructeur pour chacun des appareils. Au contraire, la puissance frigorifique donnée par le constructeur est supérieure, dans les deux cas, à celle que nous mesurons. Par conséquent, les EER calculés sont inférieurs à ceux du constructeur.

2.2.c Les rafraîchisseurs adiabatiques

Dynamique

La Figure 2-10 et la Figure 2-11 présentent l'évolution au fil de la semaine des températures et des humidités relatives à l'entrée et à la sortie des appareils évaporatifs, la différence de température entre l'entrée et la sortie, la différence de température potentielle, la consommation d'eau et la consommation de courant, respectivement pour le magicool et le mastercool. Les différentes vitesses de ventilation sont indiquées par v1, v2 et v3. Le mode de refroidissement est indiqué par ON et le mode ventilation par OFF.

Lorsque les appareils sont en mode ventilation, la température et l'humidité relative à l'entrée des appareils sont égales à la température et l'humidité relative à la sortie des appareils. C'est également le cas en mode refroidissement lorsque le réservoir d'eau des appareils est vide. En mode refroidissement lorsque le réservoir d'eau est plein, la température de sortie des appareils est légèrement inférieure à la température d'entrée, et l'humidité relative à la sortie, entre 77% et 92% pour le magicool et entre 62% et 92% pour le mastercool, est supérieure à celle d'entrée.

En mode ventilation, la différence de température entre l'entrée et la sortie des appareils est nulle, tout comme la différence de température potentielle et la consommation d'eau. Concernant le mode refroidissement il y a deux cas de figure : lorsque le réservoir contient de l'eau et lorsque celui-ci est vide. Lorsque ΔT_{in-out} chute à 0, alors le réservoir d'eau est vide et les appareils se comportent de la même manière qu'en mode ventilation. Lorsque le réservoir d'eau est plein, la différence de température entre l'entrée et la sortie est toujours inférieure à 8°C, proportionnelle à la différence de température potentielle et il y a une consommation d'eau.

Dans les deux cas, la consommation de courant en mode ventilation est équivalente à la consommation de courant en mode refroidissement et toujours inférieure à 4 A. Elle est plus élevée pour le mastercool que pour le magicool. Pour les deux appareils, la consommation de courant

dépend de la vitesse de ventilation. Elle est plus élevée en vitesse 3 qu'en vitesse 2, et la consommation en vitesse 2 est plus élevée qu'en vitesse 1.

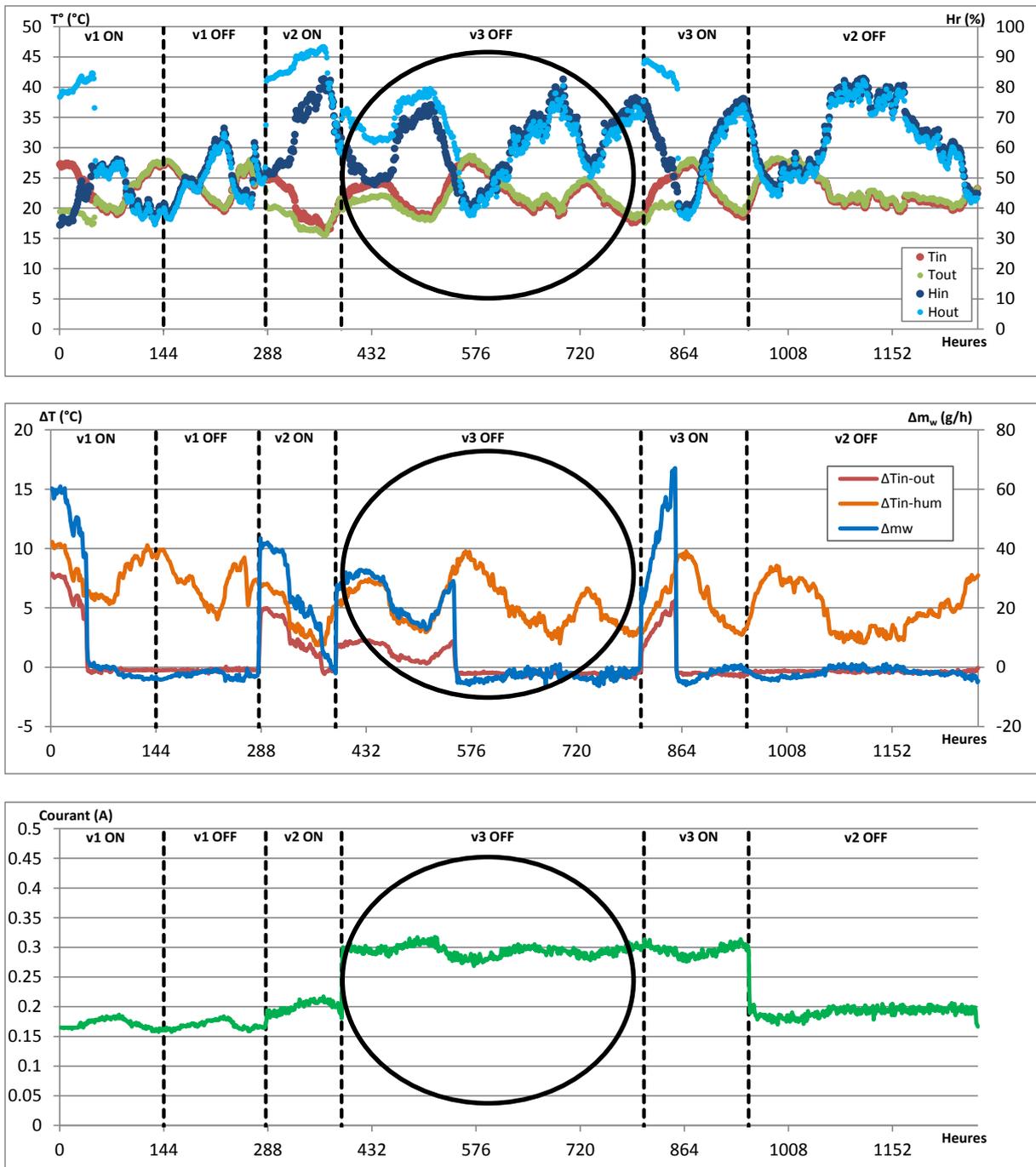


Figure 2-10 : Dynamique du fonctionnement du magicool. Températures d'entrée (T_{in}), de sortie (T_{out}) et humidités relatives à l'entrée (H_{in}) et à la sortie (H_{out}) (haut) ; Différence de température entre l'entrée et la sortie (ΔT_{in-out}), différence de température potentielle (ΔT_{in-hum}) et consommation en eau (Δm_w) (milieu) ; Consommation de courant (bas)

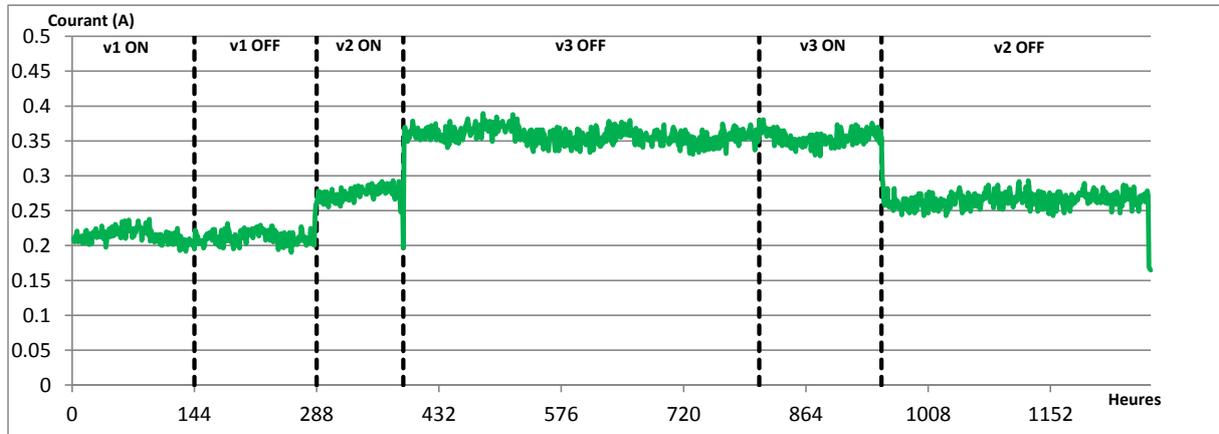
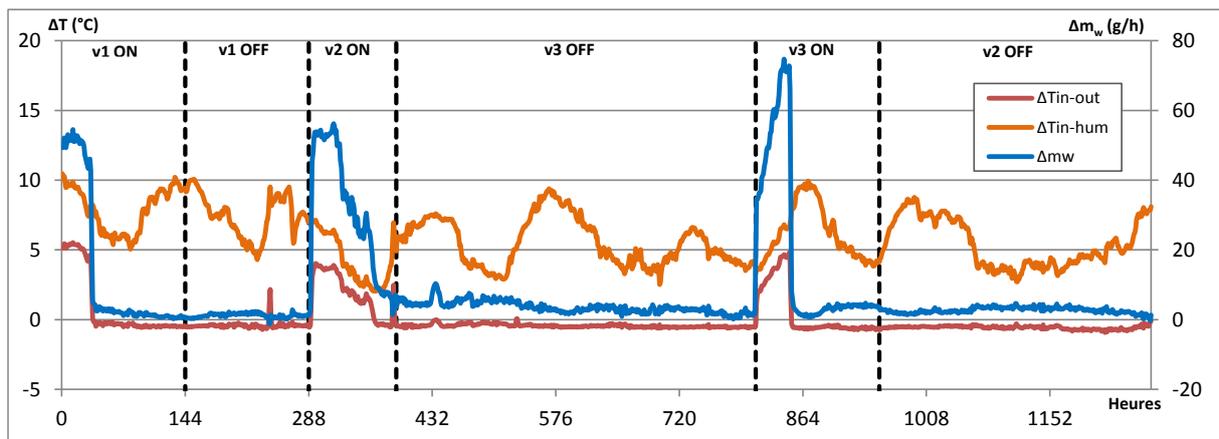
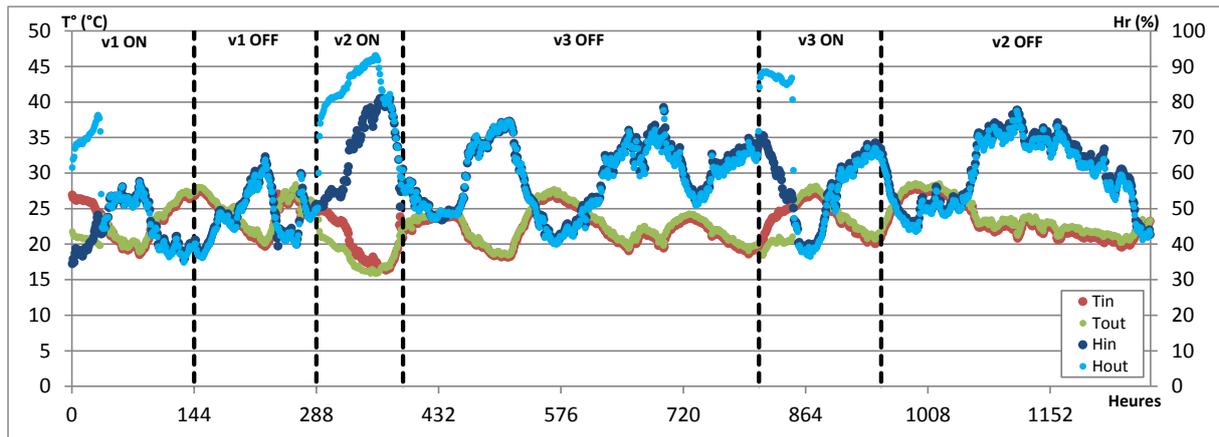


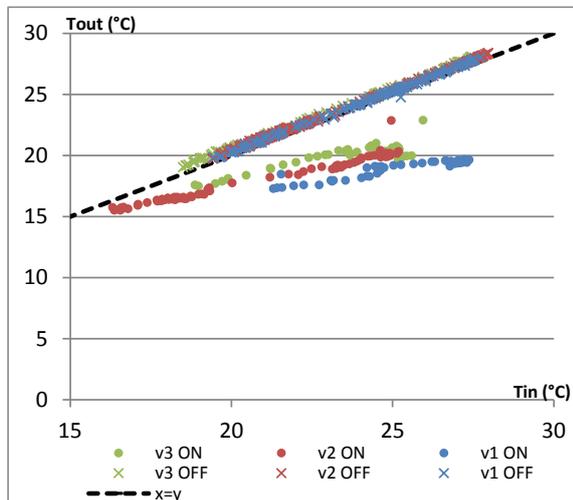
Figure 2-11 : Dynamique du fonctionnement du mastercool. Températures d'entrée (T_{in}), de sortie (T_{out}) et humidités relatives à l'entrée (H_{in}) et à la sortie (H_{out}) (haut) ; Différence de température entre l'entrée et la sortie (ΔT_{in-out}), différence de température potentielle (ΔT_{in-hum}) et consommation en eau (Δm_w) (milieu) ; Consommation de courant (bas)

Ces résultats sont analysés de façon plus précise dans les graphiques suivants. Les points entourés en noir dans la Figure 2-10 ne sont pas pris en compte dans les figures suivantes pour cause d'incertitudes sur les conditions de la prise de mesures. Les appareils ayant un comportement similaire en mode ventilation et en mode refroidissement avec un réservoir d'eau vide, on distinguera par la suite uniquement les fonctionnements en mode refroidissement avec ou sans eau.

Température de sortie (Tout)

La Figure 2-12 présente la température en sortie des appareils magicool et mastercool avec eau (ON) et sans eau (OFF) dans leur réservoir pour les trois différentes vitesses de ventilation en fonction de la température en entrée.

MAGICOOL



MASTERCOOL

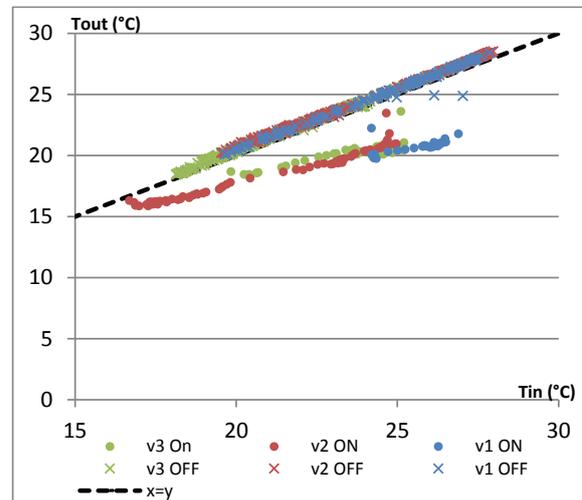


Figure 2-12 : Température de sortie (Tout) en fonction de la température d'entrée (Tin) avec le réservoir plein (ON) et avec le réservoir vide (OFF) pour le magicool (gauche) et le mastercool (droite)

Les deux appareils de refroidissement par évaporation portables ont des comportements semblables.

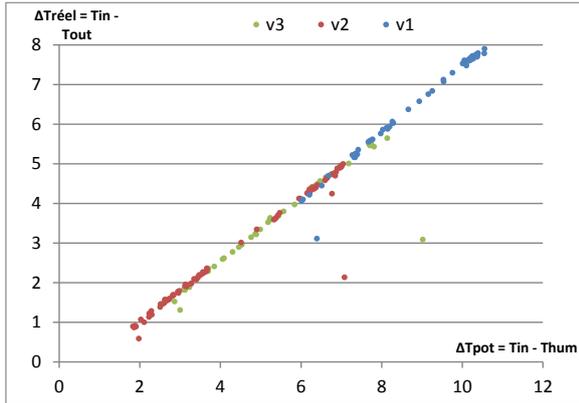
Comme vu précédemment, lorsque les appareils ont leur réservoir vide, la température de sortie est égale à la température d'entrée. En effet, les droites se superposent exactement à la droite en pointillés noirs qui est la fonction linéaire $x=y$.

Lorsque les appareils sont en mode refroidissement et ont de l'eau dans leur réservoir, la température de sortie des rafraîchisseurs adiabatiques est comprise entre 15°C et 22°C et augmente avec la température d'entrée. De la même façon que pour les climatiseurs classiques, la température de sortie en vitesse de ventilation 1 est plus faible que pour les deux autres vitesses plus rapides.

Efficacité d'humidification

La Figure 2-13 présente la différence de température entre l'entrée et la sortie des appareils magicool et mastercool en mode refroidissement pour les trois différentes vitesses de ventilation en fonction de la différence de température potentielle. Autrement dit, cette figure nous montre l'efficacité d'humidification des appareils.

MAGICOOL



MASTERCOOL

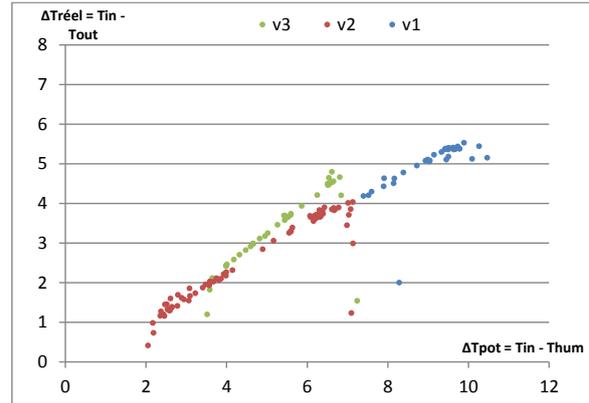


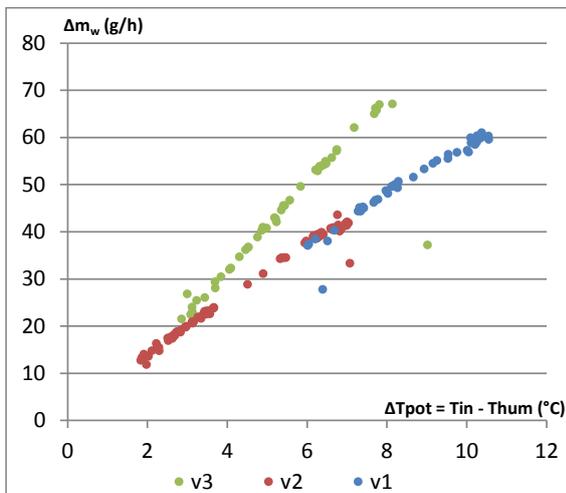
Figure 2-13 : Différence de température entre l'entrée et la sortie ($\Delta T_{réel}$) en fonction de la différence de température potentielle (ΔT_{pot}) pour le magicool (gauche) et le mastercool (droite)

L'efficacité est de 0.79 pour le magicool et de 0.55 pour le mastercool.

Consommation d'eau (Δm_w)

La Figure 2-14 présente la consommation d'eau des appareils magicool et mastercool en mode refroidissement pour les trois vitesses de ventilation en fonction de la différence de température potentielle.

MAGICOOL



MASTERCOOL

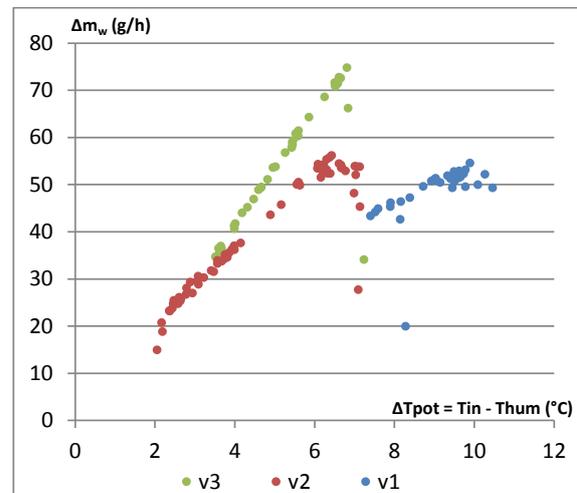


Figure 2-14 : Consommation d'eau (Δm_w) en fonction de la différence de température potentielle (ΔT_{pot}) pour le magicool (gauche) et le mastercool (droite)

Dans les deux cas, pour un même ΔT_{pot} , les appareils consomment plus d'eau en vitesse de ventilation 3 que pour les deux autres vitesses. Dans le cas du magicool, les vitesses de ventilation 1 et 2 sont équivalentes et consomment la même quantité d'eau. Dans le cas du mastercool, la vitesse de ventilation 1 consomme moins d'eau que la vitesse de ventilation 2. Cela peut s'expliquer par les débits d'air des différentes vitesses de ventilation. En effet, dans les deux cas le débit d'air en vitesse de ventilation 3 est supérieur aux débits d'air des deux autres vitesses. Les débits d'air des vitesses 1 et 2 du magicool sont très proches alors qu'ils sont plus éloignés dans le cas du mastercool (Tableau 2-1, p.22).

Pour un même ΔT_{pot} , le mastercool consomme plus d'eau que le magicool en vitesse de ventilation 2 ou 3. Dans tous les cas, plus le ΔT_{pot} augmente, plus il y a de consommation d'eau et plus l'écart de consommation entre les différentes vitesses de ventilation augmente. Lorsque le ΔT_{pot} est inférieur à 3°C, alors l'écart de consommation d'eau entre les vitesses est quasiment imperceptible.

Puissance électrique

D'après la Figure 2-10 et la Figure 2-11, la consommation de courant des rafraîchisseurs adiabatiques semble être comprise entre 0.15 A et 0.4 A. Ces courants étant faibles, il n'est pas possible de se fier aux mesures effectuées par le capteur de courant avec un fond d'échelle de 100 A comme expliqué au paragraphe 1.4.b. D'autres mesures ont donc été effectuées de façon ponctuelle avec une pince ampèremétrique de 10 A. Les valeurs des puissances électriques sont indiquées dans le Tableau 2-3.

Type	Puissance électrique (W)	Type	Puissance électrique (W)
Magicool v1 ON	28.7	Mastercool v1 ON	39.4
Magicool v2 ON	39.6	Mastercool v2 ON	53.3
Magicool v3 ON	59.7	Mastercool v3 ON	65.7
Magicool v1 OFF	28.2	Mastercool v1 OFF	39.0
Magicool v2 OFF	38.2	Mastercool v2 OFF	51.0
Magicool v3 OFF	57.1	Mastercool v3 OFF	63.2

Tableau 2-3 : Valeurs des mesures ponctuelles des puissances électriques du magicool et du mastercool pour les différentes vitesses de ventilation en mode refroidissement avec eau (ON) et en mode ventilateur sans eau (OFF)

Il existe une différence de puissance électrique entre les différentes vitesses de ventilation pour chacun des appareils. Que ce soit en mode refroidissement ou en mode ventilation, la vitesse 3 présente une puissance plus élevée que la vitesse 2, elle-même plus haute que celle de la vitesse 1. De plus, les puissances électriques en mode ventilation sont très légèrement plus faibles qu'en mode refroidissement. Enfin, la mastercool présente des puissances électriques supérieures à celles du magicool.

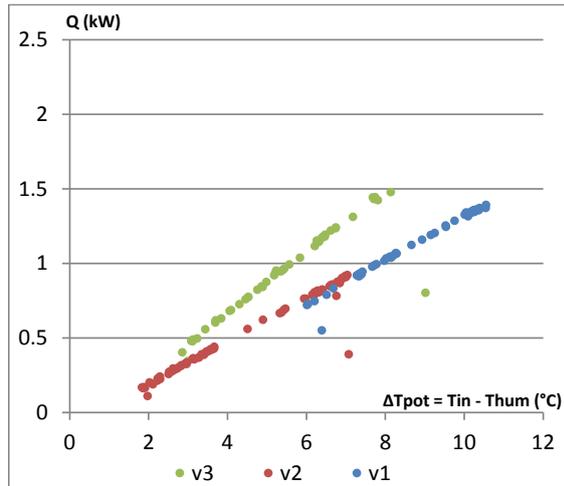
Puissance frigorifique

La Figure 2-15 présente la puissance frigorifique des appareils magicool et mastercool en mode refroidissement pour les trois différentes vitesses de ventilation en fonction de la différence de température potentielle.

Dans les deux cas et pour un même ΔT_{pot} , la puissance frigorifique en vitesse de ventilation 3, principalement comprise entre 0.5 kW et 1.5 kW, est supérieure à celles des deux autres vitesses, comprises entre 0.1 kW et 1.5 kW pour le magicool et entre 0.1 kW et 1 kW pour le mastercool.

Dans le cas du magicool, les puissances frigorifiques pour un même ΔT_{pot} pour les vitesses de ventilation 1 et 2 sont égales. Dans le cas du mastercool, la puissance frigorifique en vitesse de ventilation 1 est plus faible qu'en vitesse de ventilation 2. Pour un même ΔT_{pot} , la puissance frigorifique du mastercool en vitesses 2 et 3 est plus importante que celle du magicool.

MAGICOOL



MASTERCOOL

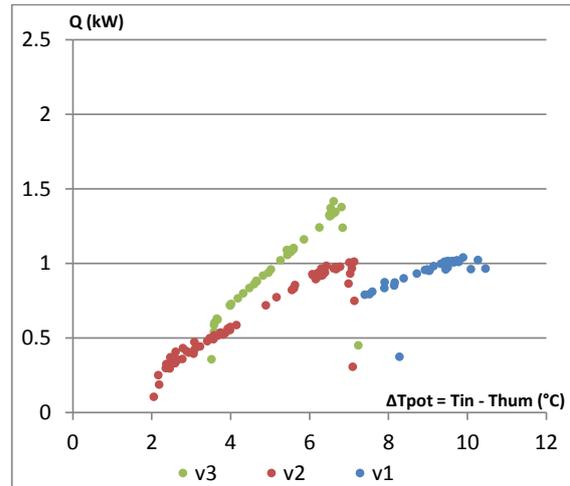
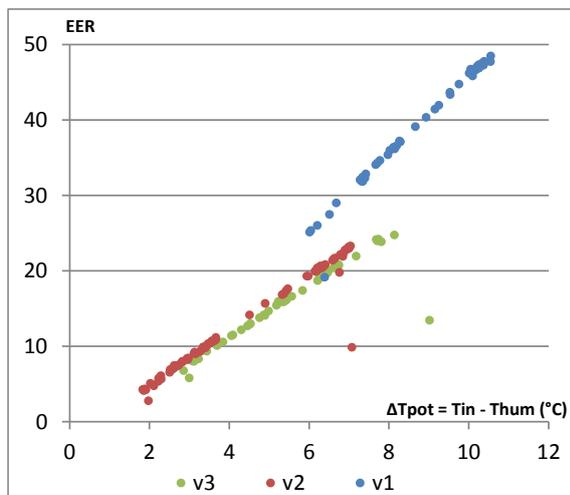


Figure 2-15 : Puissance frigorifique en fonction de la différence de température potentielle (ΔT_{pot}) pour le magicool (gauche) et le mastercool (droite)

Energy Efficiency Rating (EER)

La Figure 2-16 présente le rapport d'efficacité énergétique (EER) des appareils magicool et mastercool en mode refroidissement pour les trois vitesses de ventilation en fonction de la différence de température potentielle.

MAGICOOL



MASTERCOOL

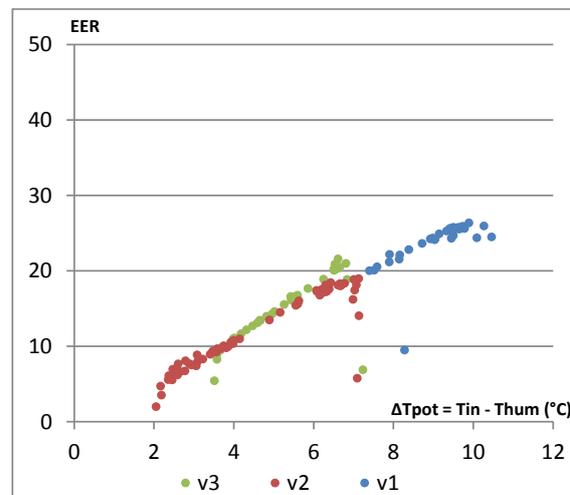


Figure 2-16 : EER en fonction de la différence de température potentielle (ΔT_{pot}) pour le magicool (gauche) et le mastercool (droite)

Les deux appareils ont des EER sensiblement identiques, compris entre 2 et 25, pour les vitesses de ventilation 2 et 3. Le magicool a un EER compris entre 25 et 50 en vitesse de ventilation 1, alors que celui du mastercool est compris uniquement entre 20 et 30. L'EER des appareils augmente avec la différence de température potentielle.

2.2.d Données constructeur

Le Tableau 2-4 présente la puissance nominale et la puissance frigorifique données par le constructeur, l'EER déduit, ainsi que la puissance électrique, la puissance frigorifique et l'EER obtenus à partir de nos mesures pour le magicool et le mastercool.

	Magicool	Mastercool
Puissance nominale constructeur (W)	52	85
Puissance électrique mesurée (W)	29 – 60	39 – 66
Puissance frigorifique constructeur (kW)	0.5	1.1
Puissance frigorifique mesurée (kW)	0.1 – 1.5	0.1 – 1.5
EER constructeur	8.9	13.5
EER mesuré	2 – 50	2 – 30

Tableau 2-4 : Puissances nominales, puissances frigorifiques et EER du CL 550 et du CL 1250 donnés par le constructeur et obtenus par nos mesures

La puissance nominale donnée par le constructeur pour le magicool est comprise dans l'échelle des puissances électriques mesurées. Pour le mastercool, la puissance électrique mesurée est inférieure à celle du constructeur. Concernant la puissance frigorifique, les valeurs que l'on a calculées comprennent bien les données du constructeur. Cependant, la puissance frigorifique fournie par le constructeur est valable uniquement pour certaines conditions⁷. Il en est donc de même pour l'EER. Cela permet d'expliquer pourquoi les EER que l'on calcule sont très variables et peuvent être bien supérieurs à ceux donnés par le constructeur.

2.3 Comparaison entre les climatiseurs classiques et les rafraîchisseurs adiabatiques

2.3.a Vitesses d'air

Les deux dispositifs de refroidissement forment un cône d'air, avec une vitesse de l'air qui diminue avec la distance à l'appareil mais également avec l'angle. Dans l'axe d'éjection et à une distance de 0.5 m de l'appareil, la vitesse des climatiseurs se situe aux alentours de 4 – 6 m/s (selon le modèle et l'intensité de ventilation choisie), contre 2 – 3 m/s pour les rafraîchisseurs adiabatiques. A 2 m de distance, ces vitesses chutent aux alentours de 2 m/s, respectivement 1 m/s. Les vitesses sont quasiment nulles pour des angles de 40° ou -40°.

2.3.b Température

Pour une température à l'entrée située entre 17 et 28°C, et lorsqu'ils sont en mode refroidissement, les climatiseurs ont une température de sortie comprise entre 5°C et 15°C, soit une température bien plus faible que pour les rafraîchisseurs évaporatifs dont la température de sortie se situe entre 15°C et 22°C. Ainsi, la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'appareil est comprise entre 8°C et 17°C pour les climatiseurs classiques alors qu'elle est inférieure à 8°C pour les rafraîchisseurs adiabatiques.

⁷ Valable pour une température ambiante de 38°C à 0% d'humidité et de 21°C à 100% d'humidité et une température de la pièce de 27,4°C

2.3.c Puissance électrique

La différence de puissance électrique entre le mode ventilateur et le mode refroidissement est très visible pour les climatiseurs classiques alors qu'elle est peu flagrante pour les rafraîchisseurs adiabatiques. En effet, la puissance électrique des climatiseurs classiques est comprise entre 130 W et 170 W en mode ventilateur, et entre 800 W et 1400 W en mode refroidissement. Les rafraîchisseurs adiabatiques consomment quant à eux entre 28 W et 66 W dans les deux modes.

Il existe donc une importante différence de consommation électrique entre les climatiseurs classiques et les rafraîchisseurs adiabatiques, les premiers consommant entre 20 et 30 fois plus d'électricité que les seconds.

2.3.d Puissance frigorifique

Selon le potentiel d'humidification, les rafraîchisseurs évaporatifs fournissent entre 0.1 kW et 1.5 kW de froid sans différence notable entre les différentes vitesses de ventilation. Les climatiseurs classiques fournissent entre 1 kW et 2.2 kW.

2.3.e Energy Efficiency Rating (EER)

Le rapport d'efficacité énergétique (EER) est nettement meilleur dans le cas des rafraîchisseurs adiabatiques (entre 2 et 50) que dans le cas des climatiseurs classiques (entre 1.1 et 2.1).

PARTIE 3 Caractérisation des phases de l'expérience et fonctionnement sur quelques jours types

Cette troisième partie du travail présente les caractéristiques climatiques de l'été 2011 et plus particulièrement des trois phases de l'expérience. Afin de mieux comprendre la réponse des bureaux aux conditions externes et internes, une description de l'évolution des différentes mesures enregistrées est réalisée au cours de trois jours types (un jour par phase).

3.1 Caractéristiques climatiques

3.1.a Caractéristiques du climat durant la période étudiée à Genève

Pour rappel, l'expérience se déroule du 4 juillet 2011 au 25 septembre 2011. Le Tableau 3-1 présente la température minimale, la température maximale, la température moyenne et le rayonnement global horizontal pour les mois de juillet, août et septembre de l'année 2011 et de l'année normée pour la période 1981-2010 à Genève, ainsi que les écarts pour chaque mois.

	Tmin (°C)			Tmax (°C)			Tmoy (°C)			Gh (kWh/m ²)		
	2011	Normée	Ecart	2011	Normée	Ecart	2011	Normée	Ecart	2011	Normée	Ecart
Juillet	8.9	14.4	-5.5	29.1	26.5	2.6	18.2	20.2	-2	179.9	186.7	-6.8
Août	8.7	14	-5.3	34.1	25.8	8.3	21	19.5	1.5	176	159.9	16.1
Septembre	8.2	10.8	-2.6	28.5	20.9	7.6	17.9	15.4	2.5	125.5	112.3	13.2
Total	8.2	10.8	-2.6	34.1	26.1	7.6	19	18.4	0.6	481.4	458.9	22.5

Tableau 3-1 : Températures minimale, maximale, moyenne et rayonnement global horizontal pour les mois de juillet, août et septembre de l'année 2011 et de l'année normée pour la période 1981-2010 et écarts à la norme à Genève⁸

L'ensoleillement a été plus généreux pendant l'été 2011 qu'habituellement avec un écart de 22 kWh/m² au total sur les mois de juillet, août et septembre. L'été a été plus chaud d'environ 1°C. De façon plus précise, le mois de juillet 2011 a été légèrement plus froid et moins ensoleillé que la normale, avec un écart d'environ -2°C et -7 kWh/m². Au contraire les mois d'août et septembre ont été plus chauds et plus ensoleillés que la normale avec un écart de respectivement +1.5°C, +16 kWh/m² et +2.5°C, +13 kWh/m². Sur ces trois mois, juillet 2011 a été le mois le plus ensoleillé, août 2011 a été le mois le plus chaud, et septembre 2011 a été le mois le plus froid et le moins ensoleillé.

3.1.b Caractéristiques climatiques des trois phases de l'expérience

Pour rappel, l'expérience est divisée en trois phases de durées différentes :

- La phase 1 (du 4 juillet au 17 juillet) : 14 jours pendant lesquels les bureaux ne disposent d'aucun appareil de refroidissement.
- La phase 2 (du 18 juillet au 28 août) : la phase la plus longue avec 41 jours où la moitié des bureaux disposent d'un rafraîchisseur adiabatique et l'autre moitié d'un climatiseur classique.

⁸ Source des données : MétéoSuisse. Normes 1981-2010 [en ligne] disponible sur http://www.meteosuisse.admin.ch/web/fr/climat/climat_en_suisse/tableaux_des_normes.html (consulté le 01.03.2013) ; Relevés de la station météo de Battelle [en ligne] disponible sur <http://www.unige.ch/energie/forel/energie/activites/data-num.html> (consulté le 01.03.2013)

- La phase 3 (du 29 août au 25 septembre) : il y a un échange des appareils, les bureaux qui avaient un rafraîchisseur adiabatique dans la phase 2 ont maintenant un climatiseur classique, et vice-versa. Cette phase dure 26 jours.

La Figure 3-1 présente les températures extérieures maximale et minimale ainsi que le rayonnement global horizontal au fil des jours de l'expérience.

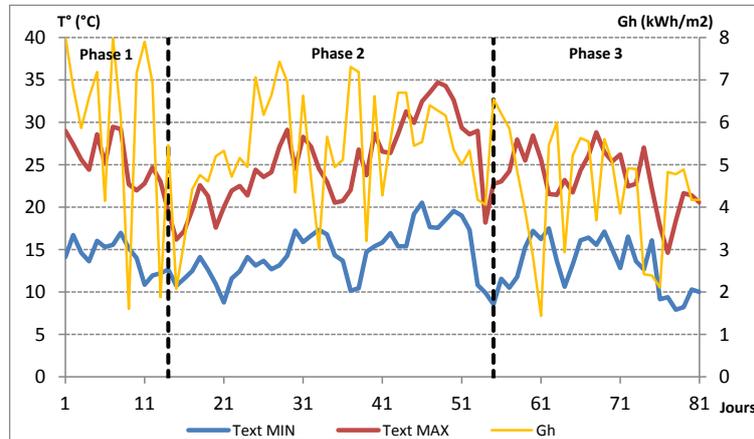


Figure 3-1 : Températures maximale et minimale et rayonnement global horizontal au cours des différentes phases de l'expérience

La Figure 3-2 présente les températures extérieures maximales classées par ordre décroissant pour les différentes phases, et les températures minimales correspondantes.



Figure 3-2 : Températures extérieures maximales classées et températures minimales correspondantes pour les différentes phases

Concernant les niveaux de températures, les phases 1 et 3 paraissent plutôt semblables. Par contre, la phase 1 a connu un ensoleillement nettement supérieur à celui de la phase 3. La phase 2 est la phase la plus longue de l'expérience, elle connaît donc des variations de température et d'ensoleillement plus grandes que les deux autres phases. En effet, au cours de cette phase la température extérieure maximale varie entre 16°C et 35°C et la température minimale entre 8°C et 21°C. Une période particulièrement chaude a eu lieu lors de cette phase 2 avec une température extérieure maximale comprise entre 30°C et 35°C et une température extérieure minimale toujours supérieure à 17°C.

3.2 Jours types

Dans cette partie, deux bureaux (le 233 et le 336) sont pris comme exemples représentatifs, et sont analysés sur trois journées types (une pour chacune des trois phases de l'expérimentation). Le bureau 233 est équipé d'un rafraîchisseur adiabatique pendant la phase 2 et d'un climatiseur classique pendant la phase 3, et inversement pour le bureau 336. Les journées dites « types » sont des journées pendant lesquelles les usagers des bureaux 233 et 336 sont présents, où ils utilisent les dispositifs de refroidissement⁹ et où la température extérieure maximale du jour dépasse 24°C. Pour rappel, lorsque les bureaux sont équipés d'un climatiseur classique, il y a toujours une fenêtre au sein des bureaux qui est scellée et ne peut donc pas être ouverte.

3.2.a Phase 1

La journée du 6 juillet 2011 est prise comme exemple pour la phase 1. Au cours de cette phase les bureaux ne disposent d'aucun appareil de refroidissement. La Figure 3-3 présente la température extérieure, les températures des vitrages, le rayonnement global horizontal, la température de la pièce, l'humidité relative de l'air extérieur, l'humidité relative de l'air de la pièce, le temps de présence et les durées d'ouverture des fenêtres pour le bureau 233 et le bureau 336 pendant cette journée type.

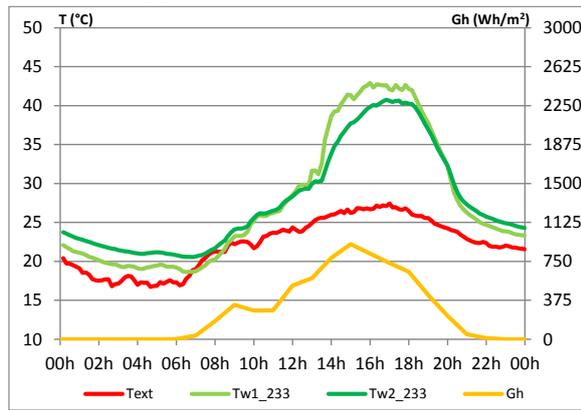
L'ensoleillement global de cette journée est de 6.8 kWh/m². La température extérieure augmente et diminue avec l'ensoleillement. Elle passe de 16.7°C au minimum de la journée à 27.4°C au maximum de la journée. Les températures des vitrages sont directement dépendantes de l'ensoleillement. Ainsi, au fur et à mesure que l'ensoleillement augmente, les températures des vitrages augmentent jusqu'à dépasser les 40°C lorsque l'ensoleillement est à son maximum vers 15h. Lorsque l'ensoleillement devient moins fort vers 18h, les vitrages commencent à se refroidir. Ces températures de vitrages élevées sont une source d'inconfort pour les personnes qui se situent près d'une fenêtre.

La température intérieure dépend de la température extérieure. Cependant, de jour, c'est surtout la température des vitrages qui influe la température de la pièce. En effet, il est remarquable sur la Figure 3-3 que la température des bureaux suit la même tendance que la température des vitrages.

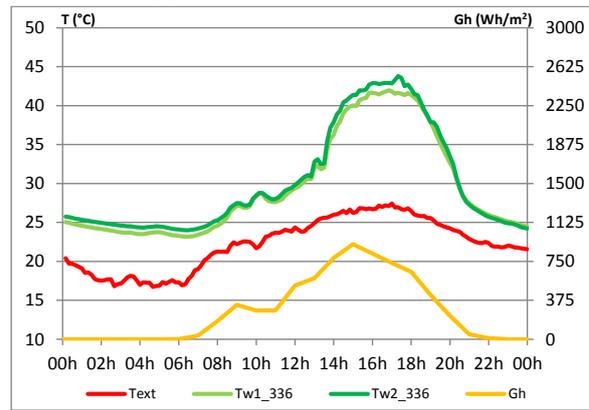
Pendant la nuit, la température de l'air dans le bureau 233 est plus faible que dans le bureau 336. En effet, vers 8h alors que la température dans le bureau 233 atteint son minimum à environ 22°C, celle du bureau 336 s'élève à 27°C, soit un écart de 5°C. Les températures des vitrages du bureau 233, plus basses que celles du bureau 336, peuvent permettre d'expliquer en partie ce phénomène. Cependant, de nuit, la température des vitrages n'est pas le facteur le plus influent sur la température de la pièce et d'autres paramètres peuvent intervenir. La personne du bureau 233 a pu laisser la porte de son bureau ouverte toute la nuit, créant ainsi un échange d'air avec le couloir, tandis que la personne du bureau 336 l'ouvre uniquement à son arrivée à 10h provoquant une diminution soudaine d'1°C de la température intérieure. La température maximale atteinte dans les bureaux pendant cette journée est d'environ 29°C.

⁹ La méthode utilisée afin de savoir si les appareils sont éteints ou allumés est expliquée en Annexe 14

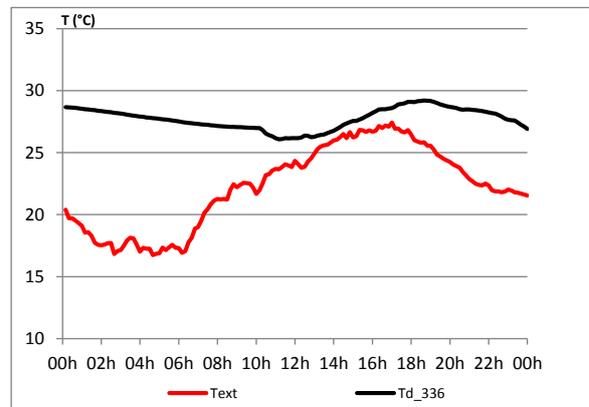
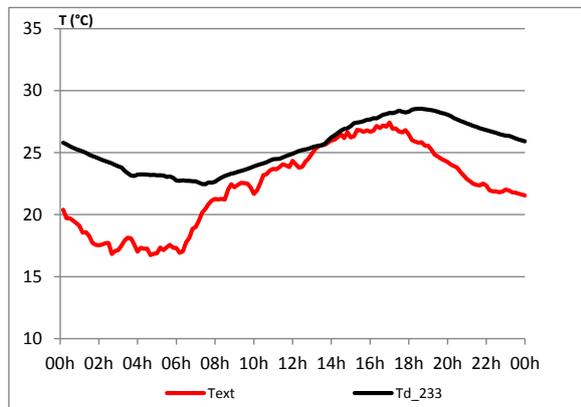
233 : sans appareil



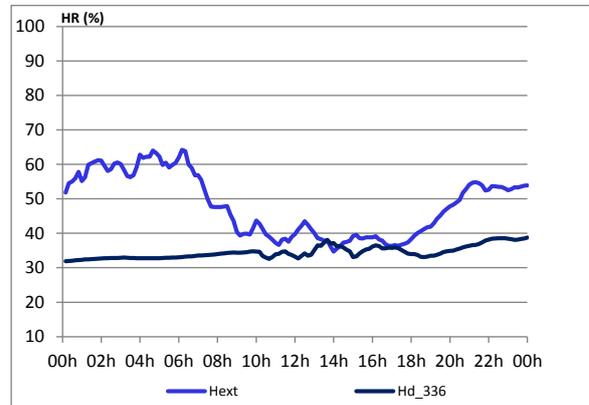
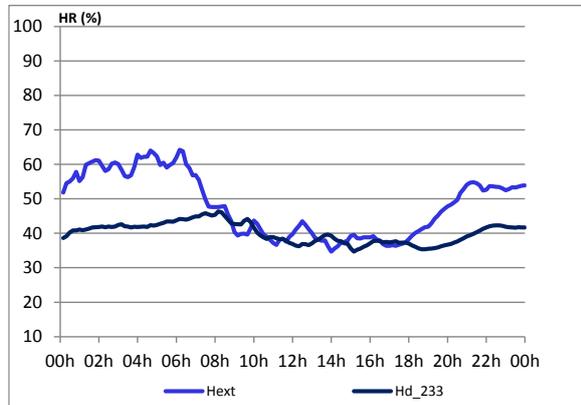
336 : sans appareil



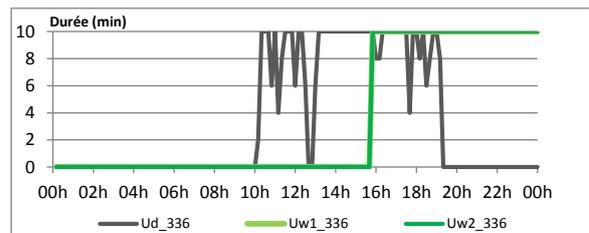
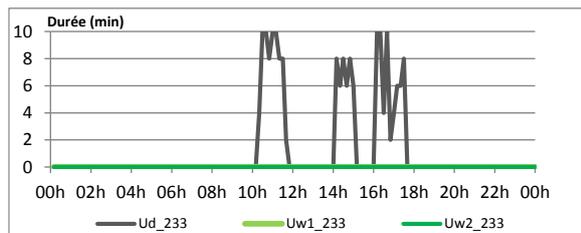
Température extérieure (Text), températures des vitrages (Tw), rayonnement global horizontal (Gh).



Température extérieure (Text), température de la pièce (Td).



Humidité relative de l'air extérieur (Hext), humidité relative de l'air de la pièce (Hd).



Temps de présence (Ud), durées d'ouverture des fenêtres (Uw).

Figure 3-3 : Températures, humidités, rayonnement global horizontal, temps de présence et durée d'ouverture des fenêtres pour le bureau 233 (gauche) et le bureau 336 (droite) au cours de la journée du 06.07.2011 par pas de temps de 10 minutes

L'humidité relative de l'air est directement liée à la température de celui-ci. Elle varie entre 34% et 65% dans le cas de l'air extérieur, entre 34% et 47% dans le cas de l'air du bureau 233 et entre 32% et 39% dans le cas du bureau 336.

La personne du bureau 233 est présente environ 3 heures et la personne du bureau 336 est présente 4 heures à des horaires similaires. Les fenêtres du bureau 233 sont restées fermées toute la journée tandis que les deux fenêtres sont ouvertes à partir de 16h dans le bureau 336. Cependant, la température extérieure étant quasiment égale à celle dans le bureau, l'ouverture des fenêtres n'entraîne pas d'effets sur la température.

La Figure 3-4 présente les sensations cochées par les occupants des bureaux 233 et 336 à différents moments de cette journée du 6 juillet 2011.

233		How do you feel?						
		cold	cool	slightly cool	neither nor	slightly warm	warm	hot
10:20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11:10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13:30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17:50	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

336		How do you feel?						
		cold	cool	slightly cool	neither nor	slightly warm	warm	hot
10:10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
11:10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				
19:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				

Figure 3-4 : Sensations cochées par les occupants des bureaux 233 (gauche) et 336 (droite) au cours de la journée du 06.07.2011

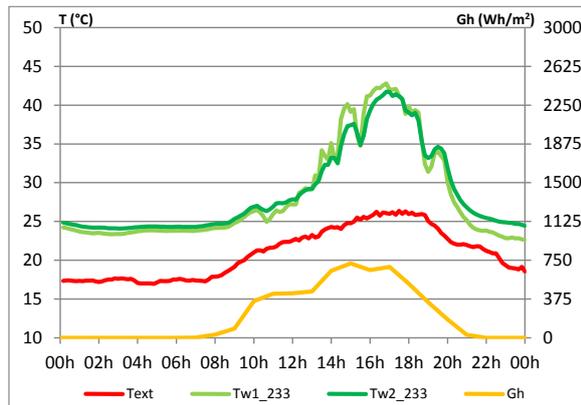
Lors de l'arrivée des occupants, vers 10h, la température dans le bureau 233 est plus faible que celle dans le bureau 336. C'est donc en toute logique que l'occupant du bureau 233 a légèrement froid tandis que celui du bureau 336 a chaud. Entre 11h et 12h, la température du bureau 336 diminue et l'occupant n'a alors ni chaud ni froid. La température des bureaux augmente dans l'après-midi et les deux personnes disent avoir très chaud.

3.2.b Phase 2

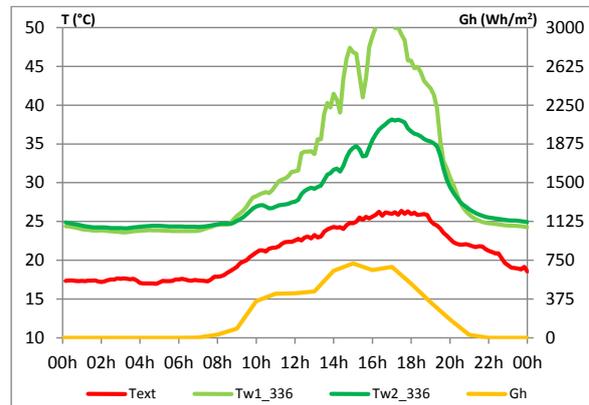
La journée du 15 août 2011 est prise comme exemple pour la phase 2. Au cours de cette phase le bureau 233 est équipé d'un rafraîchisseur adiabatique et le bureau 336 d'un climatiseur classique. La Figure 3-5 présente la température extérieure, les températures des vitrages, le rayonnement global horizontal, la température de la pièce, la température de l'air à la sortie des appareils de refroidissement, l'humidité relative de l'air extérieur, l'humidité relative de l'air de la pièce, l'humidité relative de l'air à la sortie des appareils, le temps de présence, les durées d'ouverture des fenêtres et le temps de fonctionnement des dispositifs de refroidissement pour le bureau 233 et le bureau 336 pendant cette journée type.

L'ensoleillement global de cette journée est de 5.6 kWh/m². De la même façon que précédemment, la température extérieure augmente et diminue avec l'ensoleillement. Elle passe de 16.9°C au minimum de la journée à 26.4°C au maximum de la journée. Il est également possible de remarquer que les températures des vitrages sont directement dépendantes de l'ensoleillement. L'importante différence de température entre les vitres 1 et 2 du bureau 336 est difficile à expliquer mais il est probable que le store de la fenêtre 2 soit fermé et que celui de la fenêtre 1 soit ouvert (ensoleillement direct sur la sonde de température).

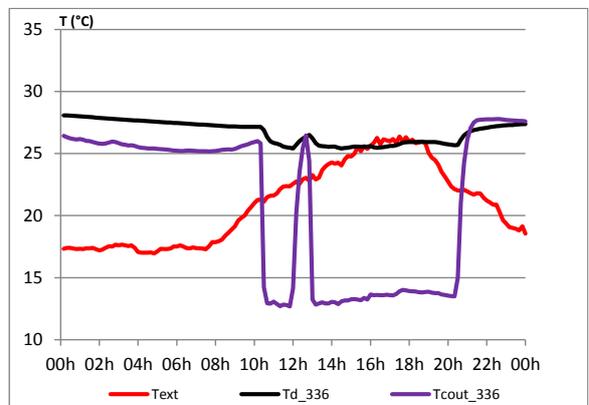
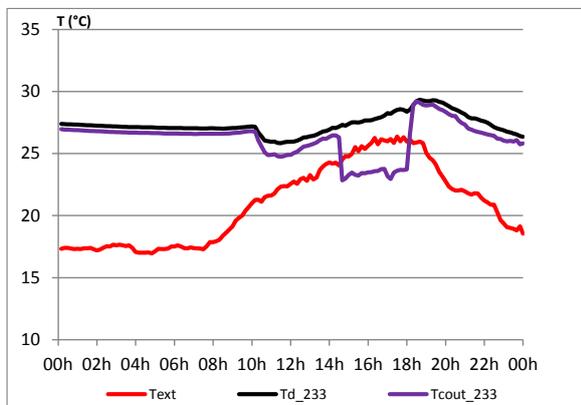
233 : rafraîchisseur



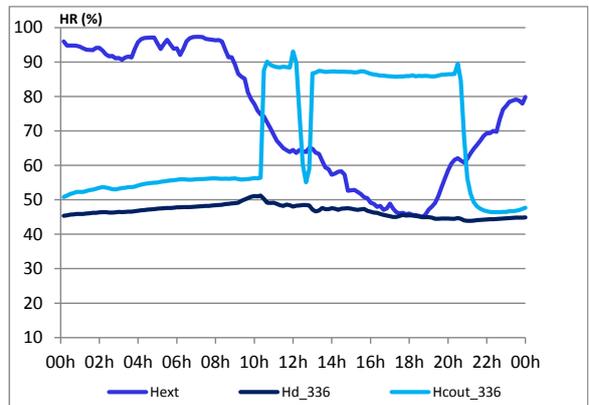
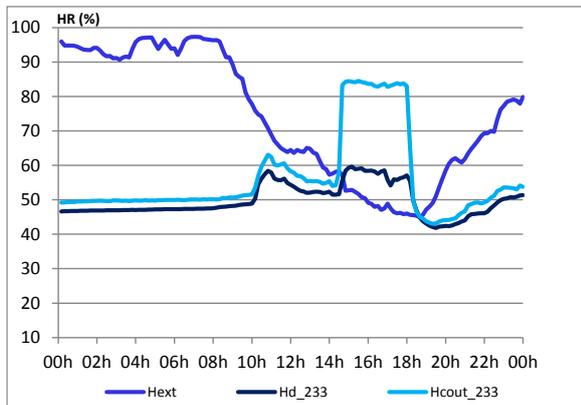
336 : climatiseur



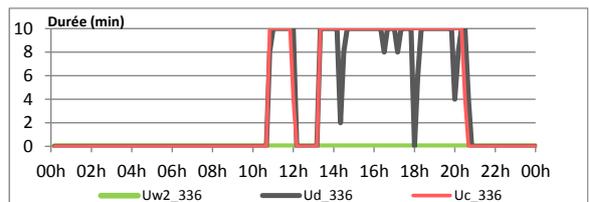
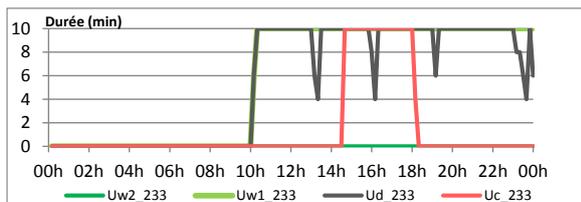
Température extérieure (Text), températures des vitrages (Tw), rayonnement global horizontal (Gh).



Température extérieure (Text), température de la pièce (Td), température de l'air à la sortie de l'appareil de refroidissement (Tcout).



Humidité relative de l'air extérieur (Hext), humidité relative de l'air de la pièce (Hd), humidité relative de l'air à la sortie de l'appareil de refroidissement (Tcout).



Temps de présence (Ud), durées d'ouverture des fenêtres (Uw), durée de fonctionnement des appareils de refroidissement (Uc).

Figure 3-5 : Températures, humidités, rayonnement global horizontal, temps de présence, durée d'ouverture des fenêtres et temps de fonctionnement des appareils pour le bureau 233 (gauche) et le bureau 336 (droite) au cours de la journée du 15.08.2011 par pas de temps de 10 minutes

Le bureau 233 est équipé d'un rafraîchisseur adiabatique (partie gauche de la Figure 3-5). La température dans la pièce est stable pendant la nuit, aux alentours de 27°C. A 10h la personne arrive et ouvre une fenêtre. La température extérieure étant de 21°C à ce moment-là, plus froide que la température intérieure, l'ouverture de la fenêtre entraîne une diminution de cette dernière d'environ 1°C. Par la suite, elle ré-augmente avec la température extérieure et celle des vitrages. A 14h30, alors que la température extérieure est de 24.5°C et la température intérieure de 27.3°C, l'utilisateur enclenche le rafraîchisseur adiabatique. Cela a pour conséquence immédiate de diminuer d'environ 5°C la température de l'air à la sortie de l'appareil, qui passe à 23°C alors que jusqu'à présent elle était égale à la température de la pièce. Cela entraîne également une forte augmentation de l'humidité relative à la sortie de l'appareil qui passe d'environ 50% (l'humidité relative de la pièce) à 85%. L'enclenchement de l'appareil de refroidissement n'a pas d'effet significatif sur la température de la pièce qui continue d'augmenter avec la température extérieure et la température des vitrages. Au contraire, il a un effet sur l'humidité relative de l'air de la pièce qui passe de 50% à 60%. L'utilisateur arrête l'appareil à 18h, après plus de 3 heures de fonctionnement, alors qu'il est encore présent. L'humidité relative de l'air de la pièce diminue. La température du bureau suit la tendance de la température extérieure et de la température des vitrages. La température et l'humidité relative à la sortie du refroidisseur par évaporation redeviennent égales aux conditions intérieures.

Le bureau 336 est équipé d'un climatiseur classique (partie droite de la Figure 3-5). La température dans la pièce est stable pendant la nuit et équivalente à celle du bureau 233, aux alentours de 27°C. La personne arrive vers 10h, laisse la fenêtre fermée et allume le climatiseur. La température de l'air à la sortie de l'appareil de refroidissement, jusqu'alors quasiment égale à la température de la pièce, chute d'environ 15°C et atteint 13°C. La température de la pièce diminue d'environ 1.5°C, de 27.2°C à 25.6°C, alors que la température extérieure et la température des vitrages continuent à monter. L'humidité relative de l'air à la sortie du climatiseur passe de 55% à 90% et l'humidité relative de l'air de la pièce reste stable aux alentours de 50% (contenu en eau inchangé). L'utilisateur arrête l'appareil entre 12h et 13h lorsqu'il part manger et le rallume à son retour. Pendant cette période, la température et l'humidité relative à la sortie du climatiseur redeviennent égales à celles de l'air ambiant de la pièce. La température du bureau s'élève à 26.5°C, l'humidité relative reste stable. L'appareil reste ensuite allumé tout l'après-midi jusqu'au départ de la personne vers 20h. Dès lors, la température de la pièce augmente à nouveau, l'humidité relative reste stable et les conditions à la sortie du climatiseur redeviennent égales aux conditions de l'air ambiant.

Dans les deux bureaux l'ouverture des fenêtres est en adéquation avec la documentation fournie aux usagers pour le bon fonctionnement des dispositifs de refroidissement (Annexe 2 et Annexe 3). En effet, dans le bureau 233 l'utilisateur a une fenêtre ouverte pendant le fonctionnement du rafraîchisseur adiabatique, et toutes les fenêtres sont fermées lors de l'utilisation du climatiseur classique dans le bureau 336.

Le climatiseur classique permet de maintenir une température intérieure à 25.5°C tandis qu'avec le rafraîchisseur adiabatique la température intérieure monte jusqu'à 29°C. L'humidité relative de l'air de la pièce atteint 60% avec l'utilisation du rafraîchisseur adiabatique alors qu'elle ne dépasse pas 50% avec le climatiseur classique.

La Figure 3-6 présente les sensations cochées par les occupants des bureaux 233 et 336 à différents moments de cette journée du 15 août 2011.

233		How do you feel?						
		cold	cool	slightly cool	neither nor	slightly warm	warm	hot
10:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12:40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16:30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
00:30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

336		How do you feel?						
		cold	cool	slightly cool	neither nor	slightly warm	warm	hot
10:30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
11:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
12:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20:30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figure 3-6 : Sensations cochées par les occupants des bureaux 233 (gauche) et 336 (droite) au cours de la journée du 15.08.2011

L'occupant du bureau 233 a légèrement chaud au cours de la matinée mais il dit avoir très chaud dans l'après-midi même si le rafraîchisseur adiabatique est en marche. L'utilisateur n'est peut-être pas placé dans le cône d'air frais de l'appareil. L'occupant du bureau 336 allume son climatiseur à son arrivée où il considère avoir chaud, ce qui lui permet de se considérer comme neutre en fin de matinée. Au cours de l'après-midi, alors que la température intérieure est la même que durant la matinée, l'occupant ne se considère plus comme neutre mais trouve qu'il fait légèrement chaud.

3.2.a Phase 3

La journée du 9 septembre 2011 est prise comme exemple pour la phase 3. Au cours de cette phase le bureau 233 est équipé d'un climatiseur classique et le bureau 336 d'un rafraîchisseur adiabatique.

Pendant cette journée, les bureaux 233 et 336 présentent les mêmes tendances que, respectivement, les bureaux 336 et 233 pendant la journée du 15 août. C'est pourquoi nous ne développerons pas de description précise des différentes variables. Cependant, les graphiques sont visibles sur la Figure 3-8.

La Figure 3-7 présente les sensations cochées par les occupants des bureaux 233 et 336 à différents moments de cette journée du 9 septembre 2011.

233		How do you feel?						
		cold	cool	slightly cool	neither nor	slightly warm	warm	hot
15:20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16:40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

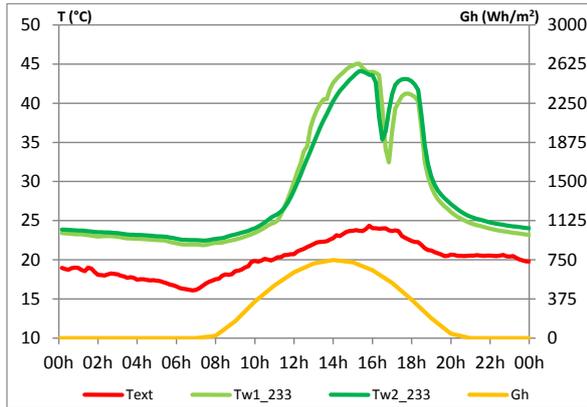
336		How do you feel?						
		cold	cool	slightly cool	neither nor	slightly warm	warm	hot
10:30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
11:30	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
12:30	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
15:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19:50	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figure 3-7 : Sensations cochées par les occupants des bureaux 233 (gauche) et 336 (droite) au cours de la journée du 09.09.2011

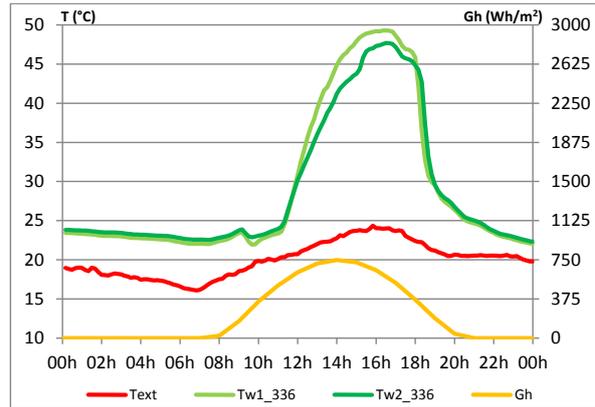
L'enclenchement du climatiseur par l'utilisateur du bureau 233 lui permet de passer d'un sentiment de très chaud à un sentiment neutre en l'espace d'1h30. Malgré l'augmentation de la température dans le bureau 336, son occupant considère cette température comme légèrement chaude.

Remarque : la personne du bureau 336 remplit le questionnaire le matin du 9 septembre 2011 à des heures qui ne correspondent pas aux mesures de présence enregistrées. La personne n'est peut-être pas placée devant le détecteur de présence.

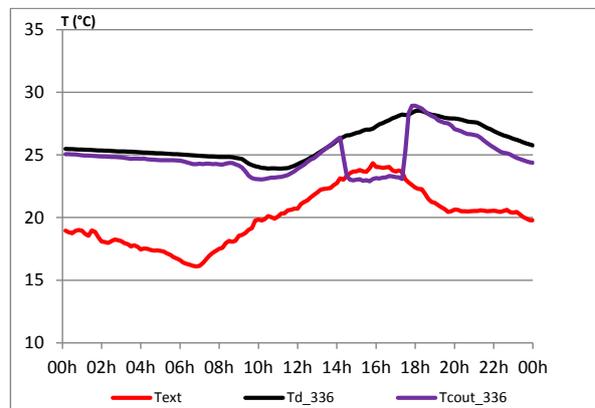
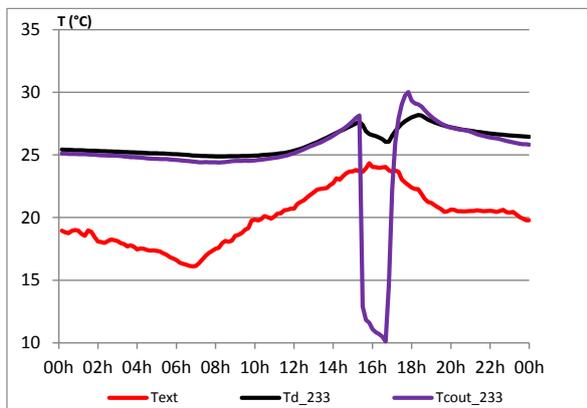
233 : climatiseur



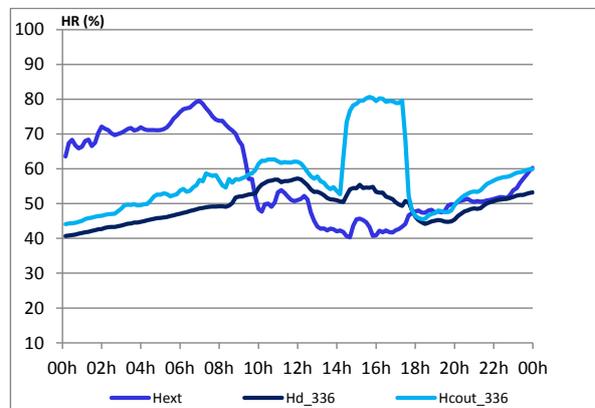
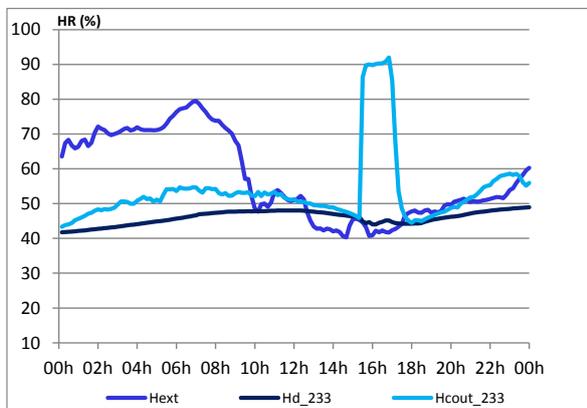
336 : rafraîchisseur



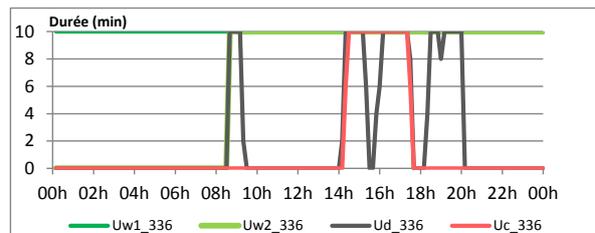
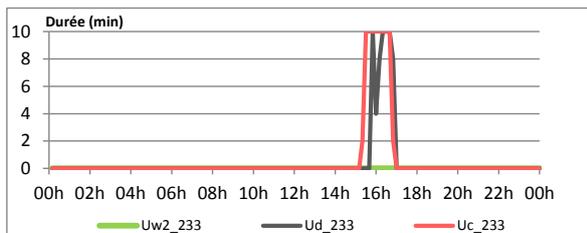
Température extérieure (Text), températures des vitrages (Tw), rayonnement global horizontal (Gh).



Température extérieure (Text), température de la pièce (Td), température de l'air à la sortie de l'appareil de refroidissement (Tcout).



Humidité relative de l'air extérieur (Hext), humidité relative de l'air de la pièce (Hd), humidité relative de l'air à la sortie de l'appareil de refroidissement (Tcout).



Temps de présence (Ud), durées d'ouverture des fenêtres (Uw), durée de fonctionnement des appareils de refroidissement (Uc).

Figure 3-8 : Températures, humidités, rayonnement global horizontal, temps de présence, durée d'ouverture des fenêtres et temps de fonctionnement des appareils pour le bureau 233 (gauche) et le bureau 336 (droite) au cours de la journée du 09.09.2011 par pas de temps de 10 minutes

Le climatiseur classique permet d'abaisser la température de la pièce tandis que le rafraîchisseur adiabatique ne diminue pas la température mais il est censé apporter une sensation de fraîcheur à l'utilisateur si celui-ci le positionne de telle façon à se trouver dans le cône d'air, à environ 23°C. L'humidité relative de la pièce augmente lors de l'utilisation du refroidisseur par évaporation alors qu'elle semble rester stable avec le climatiseur classique.

PARTIE 4 Utilisation des dispositifs de refroidissement

Cette quatrième partie expose le nombre d'heures de présence des occupants des bureaux ainsi que le nombre d'heures d'utilisation des appareils de rafraîchissement. Ces valeurs sont ensuite mises en relation avec les kWh électriques consommés par les différents dispositifs. Enfin, afin de mieux comprendre comment sont utilisés les appareils, on réalise une étude du taux d'enclenchement en fonction de la température intérieure et de la température extérieure.

4.1 Utilisation des dispositifs de refroidissement et présence des usagers

4.1.a Présence des occupants

La partie gauche de la Figure 4-1 présente le nombre d'heures de présence moyen par place de travail pendant toute la durée des phases 2 et 3 pour les bureaux équipés d'un climatiseur classique et pour les bureaux équipés d'un rafraîchisseur adiabatique. La partie droite de la Figure 4-1 présente le nombre d'heures de présence moyen par place de travail et par jour au cours des phases 2 et 3 pour chaque type de bureaux.

Remarque : pour la partie droite de la figure, on ne prend en compte que les jours où l'occupant est présent au moins 1h dans la journée. Les weekends et les vacances ne sont pas comptés.

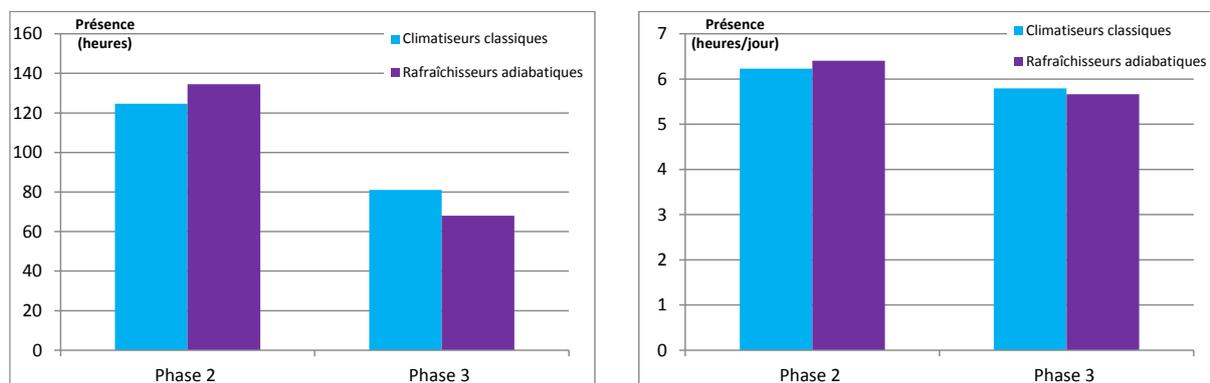


Figure 4-1 : Durée moyenne de présence par place de travail pendant toute la durée des phases 2 et 3 (gauche) ; durée moyenne de présence par place de travail et par jour au cours des phases 2 et 3 (droite) ; pour les bureaux équipés d'un climatiseur classique en bleu et pour les bureaux équipés d'un rafraîchisseur adiabatique en violet

Si l'on regarde le nombre d'heures de présence par place de travail sur toute la durée des phases 2 et 3, il est possible de remarquer que les occupants sont beaucoup moins présents lors de la phase 3. Cependant, cette dernière ne dure que 26 jours, tandis que la phase 2 dure 41 jours. Si l'on rapporte ce nombre d'heures de présence au nombre de jours où les occupants sont présents pendant la phase, alors les présences sont équivalentes entre les deux phases et les occupants sont présents en moyenne environ 6 heures par jour pendant la phase 2 et 5 heures 40 minutes pendant la phase 3. Il n'existe pas de grandes différences de présences entre les bureaux équipés d'un climatiseur classique et ceux équipés d'un rafraîchisseur adiabatique.

4.1.b Utilisation des appareils

La partie gauche de la Figure 4-2 présente le nombre d'heures moyen d'utilisation des appareils par place de travail pendant toute la durée des phases 2 et 3 pour les bureaux équipés d'un climatiseur classique et pour les bureaux équipés d'un rafraîchisseur adiabatique. La partie droite de la Figure 4-2 présente le nombre d'heures moyen d'utilisation par place de travail et par jour au cours des phases 2 et 3 pour chaque type de bureaux.

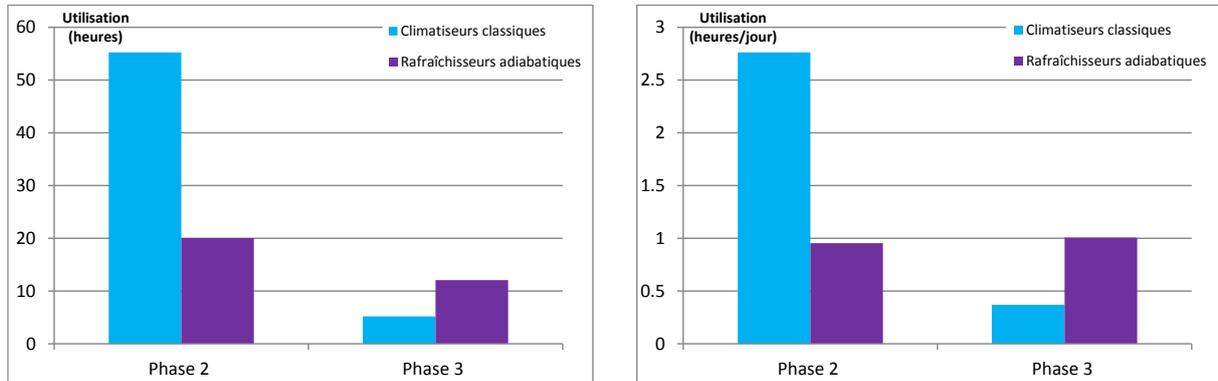


Figure 4-2 : Durée moyenne d'utilisation par place de travail pendant toute la durée des phases 2 et 3 (gauche) ; durée moyenne d'utilisation par place de travail et par jour au cours des phases 2 et 3 (droite) ; pour les bureaux équipés d'un climatiseur classique en bleu et pour les bureaux équipés d'un rafraîchisseur adiabatique en violet

De la même façon que précédemment, on ramène le nombre d'heures moyen d'utilisation au nombre de jours où les occupants sont présents pendant la phase. Il existe bien une différence d'utilisation entre les différents appareils et entre les phases. En effet, les climatiseurs classiques sont utilisés en moyenne 2 heures et 40 minutes par place de travail et par jour en phase 2 contre seulement 20 minutes en phase 3, soit une utilisation 7 fois plus faible. Au contraire, les rafraîchisseurs adiabatiques sont utilisés en moyenne environ 1 heure par place de travail et par jour pendant les deux phases. Ainsi, les climatiseurs classiques sont plus utilisés que les rafraîchisseurs évaporatifs durant la phase 2, et inversement pendant la phase 3.

4.1.c Présence et utilisation

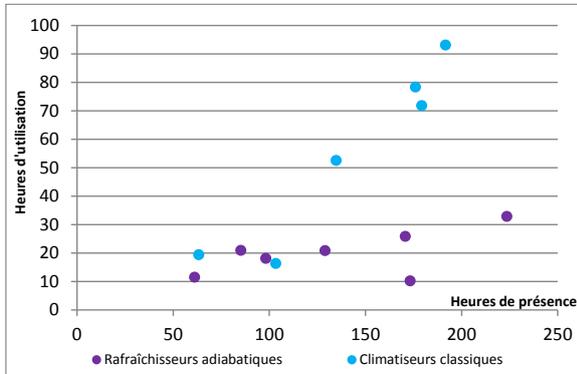
Afin de voir si présence et utilisation sont liées, les graphiques de la Figure 4-3 nous montrent la relation qu'il existe entre le nombre d'heures d'utilisation des appareils de refroidissement et le nombre d'heures de présence des usagers tout au long des phases 2 et 3. Chaque point représente une place de travail.

Comme il a déjà été dit précédemment, les heures de présences des occupants en phase 3 sont plus faibles qu'en phase 2, mais cela est à rapporter à la durée des phases (26 jours pour la phase 3 et 41 pour la phase 2). De plus, l'utilisation des climatiseurs classiques est nettement plus basse en phase 3 qu'en phase 2 alors que l'utilisation des rafraîchisseurs adiabatiques reste à peu près constante.

En dessous de 150 heures de présence, il est difficile d'observer une quelconque relation entre la présence et l'utilisation des appareils en phase 2 et en phase 3. Par contre, lorsque les usagers sont présents plus de 150 heures (phase 2), l'utilisation des appareils de refroidissement est directement liée à la présence des usagers. Plus les gens sont présents, plus les appareils de refroidissement sont utilisés, avec une utilisation moindre des rafraîchisseurs adiabatiques par rapport aux climatiseurs

classiques. En effet, pour un usager présent 150 heures, les rafraîchisseurs adiabatiques sont utilisés 15% du temps contre 60% pour les climatiseurs classiques. Nous allons voir par la suite les conditions d'enclenchement des appareils par les usagers.

Phase 2



Phase 3

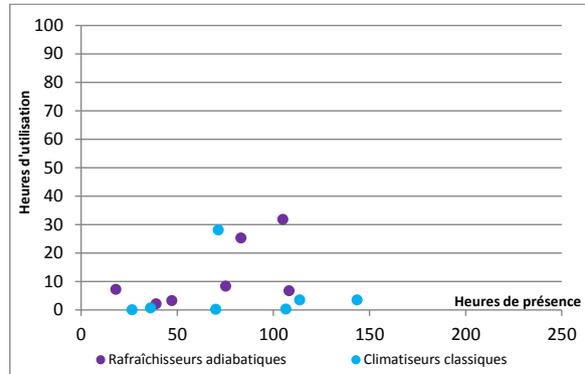


Figure 4-3 : Nombre d'heures d'utilisation des appareils en fonction du nombre d'heures de présence des usagers dans les bureaux équipés de climatiseurs classiques (bleu) et de rafraîchisseur adiabatique (violet) au cours de la phase 2 (gauche) et de la phase 3 (droite)

4.2 Utilisation et consommation électrique des appareils

La Figure 4-4 présente le nombre de kWh électriques consommés par les rafraîchisseurs adiabatiques et par les climatiseurs classiques de tous les bureaux, lors des phases 2 et 3, en fonction du nombre d'heures d'utilisation des appareils. Chaque point représente une place de travail.

Afin de calculer la consommation électrique des climatiseurs classiques, les valeurs de courant mesurées pendant les phases 2 et 3 ont été utilisées. La consommation électrique des rafraîchisseurs adiabatiques a été calculée à partir des valeurs de courant ponctuelles mesurées en dehors de l'expérience. Ne connaissant pas la vitesse de fonctionnement des appareils au cours des deux phases, la consommation électrique est donc estimée entre un minimum, qui correspond à la vitesse 1, et un maximum, qui correspond à la vitesse 3.

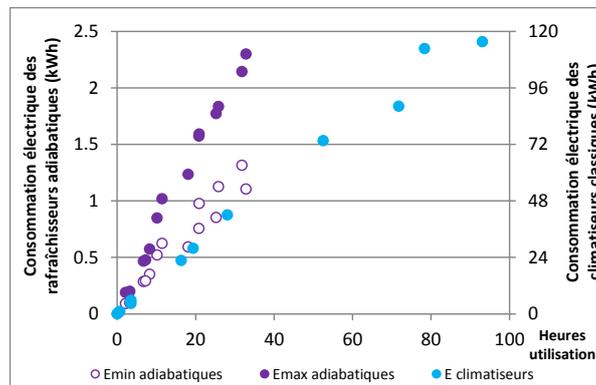


Figure 4-4 : Consommation électrique des rafraîchisseurs adiabatiques et des climatiseurs classiques en fonction du nombre d'heures d'utilisation lors des phases 2 et 3

La consommation électrique des appareils de refroidissement est liée de façon linéaire au nombre d'heures d'utilisation. Plus les appareils sont utilisés, plus la consommation électrique augmente.

Pour un nombre d'heures d'utilisation équivalent, les climatiseurs classiques consomment plus de 18 fois l'électricité consommée par les rafraîchisseurs adiabatiques, avec respectivement 13 kWh et 0.4-0.7 kWh pour 10 heures d'utilisation.

4.3 Enclenchement des dispositifs de refroidissement

Afin de mieux comprendre l'utilisation des appareils de refroidissement par les usagers, on réalise une étude du taux d'enclenchement des dispositifs durant les phases 2 et 3 de l'expérience en fonction de la température intérieure et de la température extérieure.

Remarque : les bureaux 220 et 423 présentent ponctuellement et de façon soudaine des températures intérieures supérieures à 35°C. Ces valeurs étant certainement des erreurs de mesures (potentiellement dues à des sondes au soleil), elles ne sont pas prises en compte dans les prochaines analyses de ce rapport.

Les figures suivantes présentent le nombre d'heures que l'on retrouve dans chaque classe de température lorsque les appareils sont éteints et lorsqu'ils sont allumés, ainsi que le taux d'enclenchement de ceux-ci, en fonction de la température intérieure des bureaux (Figure 4-5) et de la température extérieure (Figure 4-6). Le taux d'enclenchement ε se calcul de la manière suivante :

$$\varepsilon(T) = \frac{\text{Nombre d'heures où les dispositifs sont allumés}}{\text{Nombre total d'heures de présence}}$$

Nous pouvons déduire du taux d'enclenchement les variables a et r de l'équation de la fonction logistique qui se définit comme suit :

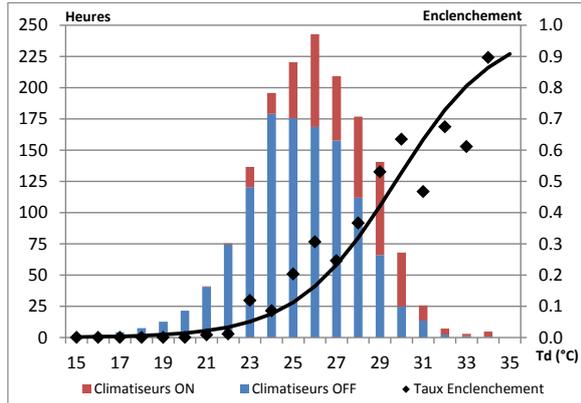
$$\varepsilon_{\text{modèle}}(T) = \frac{1}{1 + ae^{-rT}}$$

$\varepsilon_{\text{modèle}}$ représente alors le taux d'enclenchement modélisé d'après la fonction logistique¹⁰.

Il semble plus pertinent de se pencher sur le taux d'enclenchement en fonction de la température extérieure (Figure 4-6) qu'en fonction de la température des bureaux (Figure 4-5), qui est elle-même influencée par le fonctionnement des appareils. De plus, les taux d'enclenchement des phases 2 et 3 pris séparément, sont plus proches l'un de l'autre lorsqu'ils sont représentés en fonction de la température extérieure que lorsqu'ils sont représentés en fonction de la température des bureaux (Annexe 16), en particulier pour les climatiseurs classiques.

¹⁰ Les variables a et r ainsi que les coefficients de corrélation sont présentés en Annexe 15

Climatiseurs classiques



Rafraîchisseurs adiabatiques

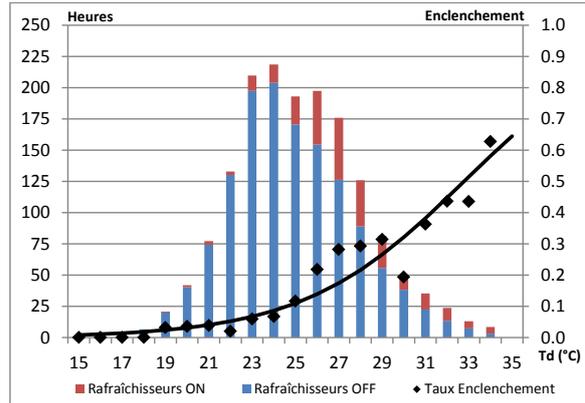
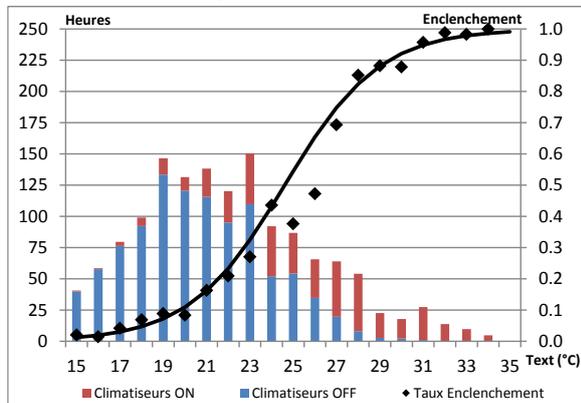


Figure 4-5 : Nombre d'heures dans chaque classe de température intérieure des bureaux lorsque les appareils sont éteints (en bleu) et lorsqu'ils sont allumés (en rouge), taux d'enclenchement (points noirs) des appareils, et taux d'enclenchement modélisé (courbe noire), pour les climatiseurs classiques (gauche) et les rafraîchisseurs évaporatifs (droite) durant les phases 2 et 3

Climatiseurs classiques



Rafraîchisseurs adiabatiques

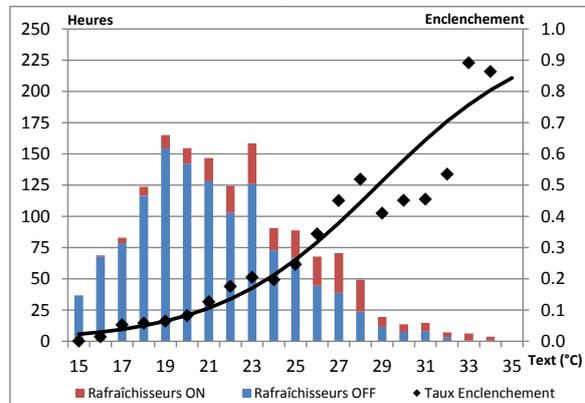


Figure 4-6 : Nombre d'heures dans chaque classe de température extérieure lors des phases 2 et 3 lorsque les appareils sont éteints (en bleu) et lorsqu'ils sont allumés (en rouge), taux d'enclenchement (points noirs) des appareils, et taux d'enclenchement modélisé (courbe noire), pour les climatiseurs classiques (gauche) et les rafraîchisseurs évaporatifs (droite) durant les phases 2 et 3

D'après la Figure 4-6, la courbe logistique des taux d'enclenchement est plus étalée dans le cas des rafraîchisseurs adiabatiques que dans le cas des climatiseurs classiques. Les 50% d'enclenchement sont atteints à partir de 29°C dans le premier cas et à partir de 25°C dans le second cas. Les climatiseurs classiques atteignent un taux d'enclenchement de 100% à partir d'une température extérieure de 35°C. Les rafraîchisseurs adiabatiques ne semblent pas atteindre un taux d'enclenchement de 100%. Il est de 80% pour une température extérieure de 34°C.

Cependant la dynamique d'enclenchement est très complexe. La décision d'enclencher l'appareil et de le laisser allumer dépend de plusieurs paramètres comme la température extérieure, la température et l'humidité de la pièce, l'anticipation de la personne, le bruit, le fait de devoir aller chercher de l'eau pour le rafraîchisseur adiabatique, etc. Ce phénomène est très complexe et dépassent les limites du champ de notre recherche.

PARTIE 5 Confort au sein des bureaux

Cette partie se concentre sur le confort au sein des bureaux. Il ne s'agit pas dans ce chapitre du confort subjectif caractérisé par la satisfaction des occupants, mais du confort hygrothermique mesuré, comparée aux normes de confort existantes.

5.1 Signature énergétique

la Figure 5-1 présente la signature énergétique en moyenne horaire (lorsque les occupants sont présents plus de 50 minutes pendant l'heure)¹¹. Cette figure représente la température intérieure (au niveau des places de travail) en fonction de la température extérieure, pendant les phases 1, 2 et 3. On sépare les bureaux en deux groupes : le groupe 1 réunit les bureaux qui disposent d'un rafraîchisseur adiabatique en phase 2, le groupe 2 réunit les bureaux qui disposent d'un climatiseur classique en phase 2 (et inversement en phase 3). On distingue deux cas : lorsque les appareils de refroidissement sont allumés pendant une heure (ON) et lorsqu'ils restent éteints pendant une heure (OFF).

Lors de la phase 1, lorsque qu'aucun appareil de refroidissement n'est mis à disposition, les deux groupes de bureaux présentent une signature énergétique semblable. En moyenne, la température à l'intérieur des bureaux s'élève aux alentours de 25°C pour 20°C extérieur, et grimpe aux alentours de 31°C pour 35°C extérieur.

Lors des phases 2 et 3, et lorsque les appareils sont éteints, les deux groupes de bureaux présentent une signature énergétique similaire à celles de la phase 1. A cet égard, les bureaux munis de climatiseurs classiques ont cependant tendance à une température légèrement plus haute dans le régime des températures extérieures fraîches, vraisemblablement à cause de la possibilité limitée d'ouverture des fenêtres (cf. analyse ci-dessous)

Lorsque les appareils sont allumés (essentiellement au-dessus de 20°C extérieur), on note une signature plus plate pour les climatiseurs : aux alentours de 27°C pour 20°C extérieur, respectivement 29°C pour 35°C extérieur. Dans le cas des rafraîchisseurs adiabatiques, la signature reste très proche de celle des périodes sans enclenchement des appareils.

De façon générale, on note cependant une forte dispersion des points, ainsi que des comportements qui varient de bureau en bureau. Cela pourrait notamment être dû à une gestion différenciée des fenêtres, des stores, ainsi que de l'ouverture nocturne des portes et de l'accès à la masse thermique des bureaux situés au nord (voir chapitre 3.2).

¹¹ Les signatures en moyennes 10 minutes (lorsque les personnes sont présentes) se trouve en Annexe 17.

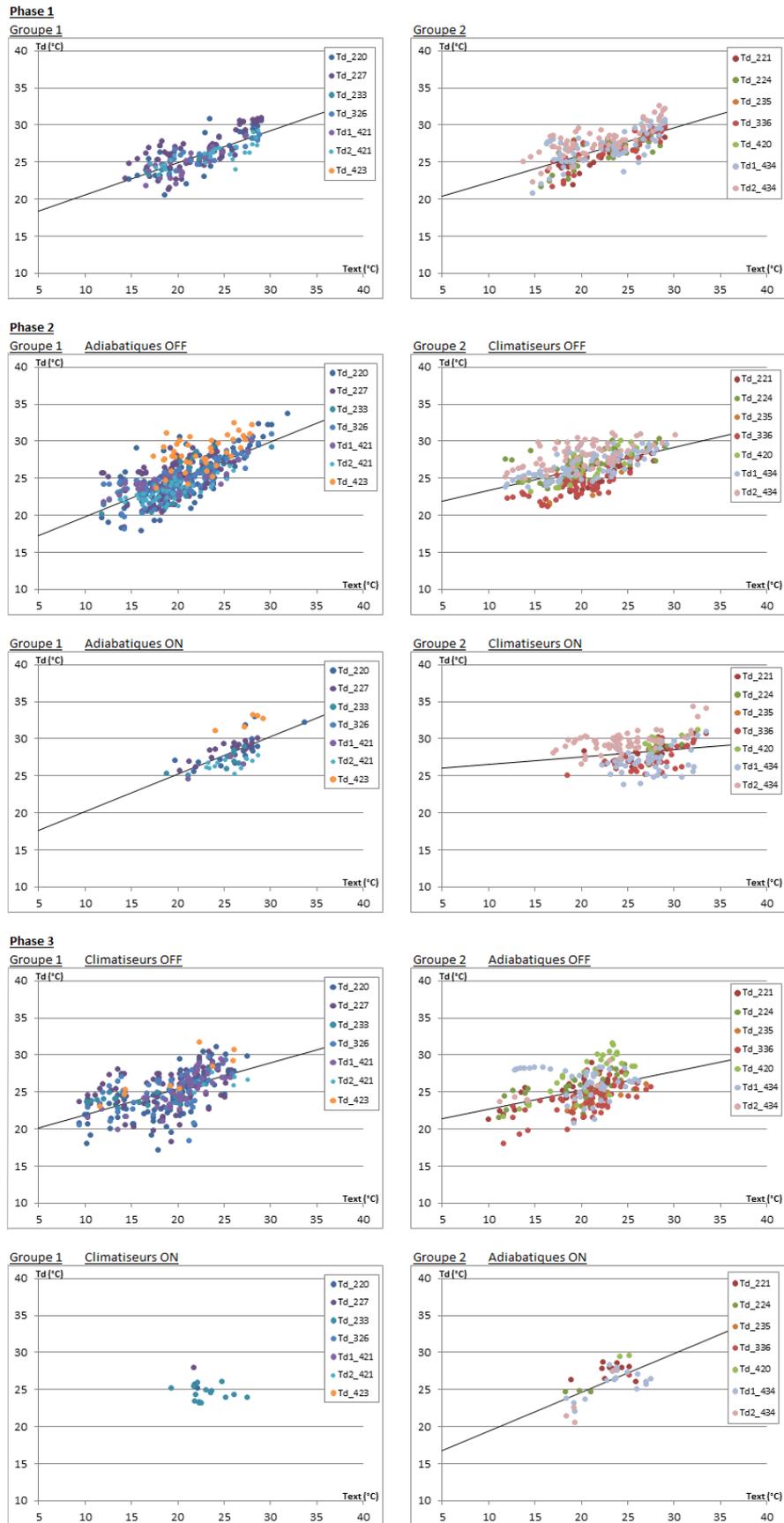


Figure 5-1 : Température intérieure en fonction de la température extérieure (moyennes horaires) pendant les phases 1, 2 et 3, lorsque les occupants sont présents plus de 50 minutes pendant l'heure

En ce qui concerne la gestion des fenêtres, on rappelle les bureaux équipés de climatiseurs classiques ont l'une des fenêtres de leur bureau scellée. Les occupants de ces bureaux ne sont donc pas en mesure d'ouvrir autant les fenêtres que leurs collègues qui disposent d'un rafraîchisseur adiabatique, ce qui pourrait expliquer pourquoi, à une température extérieure de 20°C ces bureaux présentent une température intérieure plus élevée que les bureaux munis de rafraîchisseurs adiabatiques. Ce phénomène de gestion des fenêtres est visible sur le Tableau 5-1. En effet, au cours de la phase 2, les bureaux équipés de climatiseurs classiques n'ouvrent les fenêtres que 3.5 heures en moyenne contre 13.7 heures pour les bureaux équipés de rafraîchisseurs adiabatiques.

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Groupe 1	15.6 h	13.7 h <i>(rafraîchisseurs adiabatiques)</i>	6.8 h <i>(climatiseurs classiques)</i>
Groupe 2	12.0 h	3.5 h <i>(climatiseurs classiques)</i>	11.7 h <i>(rafraîchisseurs adiabatiques)</i>

Tableau 5-1 : Ouverture moyenne des fenêtres (en heures par jour) pendant les phases 1, 2 et 3 pour les deux groupes de bureaux

L'étude détaillée de l'utilisation des fenêtres et des conséquences sur la température intérieure n'a pas été menée dans le cadre de cette étude.

5.2 Température et confort

5.2.a Normes

Norme SIA 382/1

En Suisse, la norme SIA 382/1 décrit les conditions de confort devant être atteints par une installation de ventilation et de climatisation. A cet égard, pour un habillement adapté à la saison et un taux d'activité actif et assis de 1.2 met, la norme définit une plage de température intérieure acceptable en fonction de la température journalière maximale de l'air extérieur (Figure 5-2).

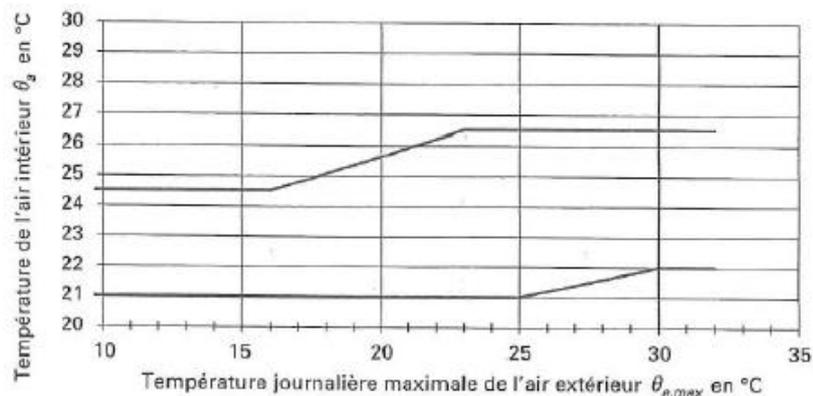


Figure 5-2 : Plage de la température de l'air intérieur selon la température journalière maximale de l'air extérieur¹²

Dès une température journalière maximale de l'air extérieur de 23°C, la température intérieure peut fluctuer entre 21°C et 26.5°C. Il est nécessaire de refroidir les locaux si les valeurs de la température intérieure dépassent la courbe limite supérieure de la Figure 5-2 pendant plus de 100 heures par an pendant les périodes d'utilisation des locaux. Il est à noter que la tolérance de 100 h se réfère à une année météorologique standard (DRY – design reference year), et n'a donc pas de valeur normative pour une année météorologique spécifique, en particulier pour une année caniculaire.

Norme EN 15251

En parallèle la Suisse a inclus la norme européenne EN 15251 du Comité Européen de Normalisation (CEN) dans la collection des normes suisses (elle ne remplace ou n'influence aucune norme SIA). Cette norme présente une approche adaptative du confort, c'est-à-dire qu'elle prend en compte l'adaptation des occupants aux conditions météorologiques récentes. Les températures intérieures acceptables définies par la norme sont valables pour des bâtiments non climatisés, principalement destinés à l'occupation humaine avec des activités sédentaires (taux d'activité entre 1.0 et 1.3 met) et où les occupants peuvent adapter leur habillement.

L'équation de la température intérieure de confort qui suit est valable uniquement pour une température extérieure de référence ($T_{ext,ref}$) comprise entre 10°C et 30°C :

$$T_{con} = 0.33 \cdot T_{ext,ref} + 18.8$$

¹² Source : Norme SIA 382/1 (2007)

où $T_{ext,ref}$ est la moyenne, pondérée sur les 7 jours précédents, de la température extérieure :

$$T_{ext,ref} = \frac{T_{j-1} + 0.8 \cdot T_{j-2} + 0.6 \cdot T_{j-3} + 0.5 \cdot T_{j-4} + 0.4 \cdot T_{j-5} + 0.3 \cdot T_{j-6} + 0.2 \cdot T_{j-7}}{3.8}$$

La fluctuation acceptable par rapport à cette température de confort est de +/- 2, 3 ou 4°C, selon la catégorie d'ambiance intérieure considérée (où encore selon le pourcentage acceptable d'occupants insatisfaits, fixé à 6, 10 ou 15%). Ces catégories sont présentées en Annexe 18. La catégorie III (niveau de confort modéré) peut en particulier être utilisé dans le cas de bâtiments existants, tels que celui de notre étude.

La Figure 5-3 présente les plages de température de confort au cours des différentes phases de l'expérience selon la norme SIA 382/1 (traits pleins) et la norme EN 15251 catégorie III (traits pointillés).

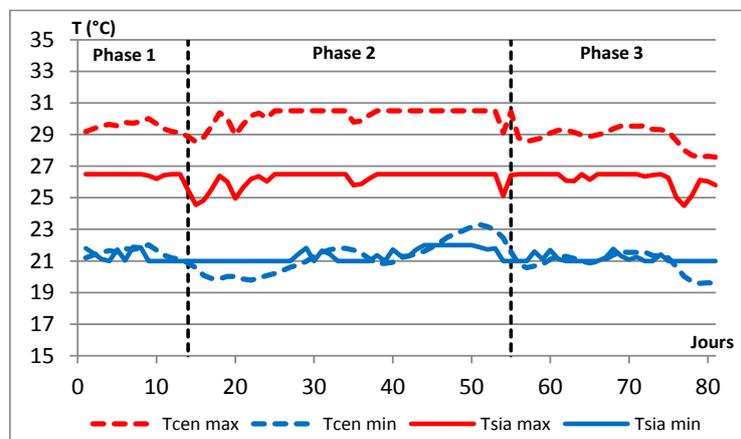


Figure 5-3 : Plages de température de confort au fil des jours des différentes phases de l'expérience, selon la norme SIA 382/1 (traits pleins) et selon la norme EN 15251 catégorie III (traits pointillés)

Les températures limites minimales des normes SIA et CEN sont très proches. Au contraire, il existe une nette différence entre les deux normes concernant la température limite supérieure. La norme CEN, qui a une approche adaptative et prend en compte le type de bâtiment, a une limite supérieure plus haute d'environ 4°C par rapport à la norme SIA.

5.2.b Résultats journaliers

Nous analysons ici l'inconfort thermique en termes de nombre d'heures, pendant la présence des occupants, pendant lesquelles la température des bureaux dépasse la valeur limite des normes ci-dessus. L'analyse est faite séparément pour les deux types d'appareils (climatiseurs classiques et rafraîchisseurs adiabatiques), sur l'ensemble des phases 2 et 3 (19 juillet au 24 septembre 2011). Les valeurs sont exprimées en valeurs journalières, moyennées sur les bureaux. A cet égard, par soucis de représentativité, seuls sont retenus : (i) les bureaux avec au moins 4 h de présence journalière ; (ii) avec ce filtre de présence, les jours avec au moins un bureau représentatif de chaque type d'appareil. Au final, l'analyse porte ainsi sur 47 jours représentatifs (par rapport au total de 67 jours pour l'ensemble de la période en question).

Nous commençons par analyser la relation entre les heures moyennes d'inconfort ainsi calculées, et la température météo maximale du jour (Figure 5-4, en rouge pour la norme SIA 382/1, en vert pour

la norme EN 15251). Sont également représentées les heures moyennes de présence des occupants (en blanc). De façon générale, on observe une présence moyenne dans les bureaux aux alentours de 7 h/jour (Note : en raison des filtres explicités ci-dessus, ces valeurs sont un peu plus élevées que les valeurs de la Figure 4-1, qui concernent la totalité des bureaux).

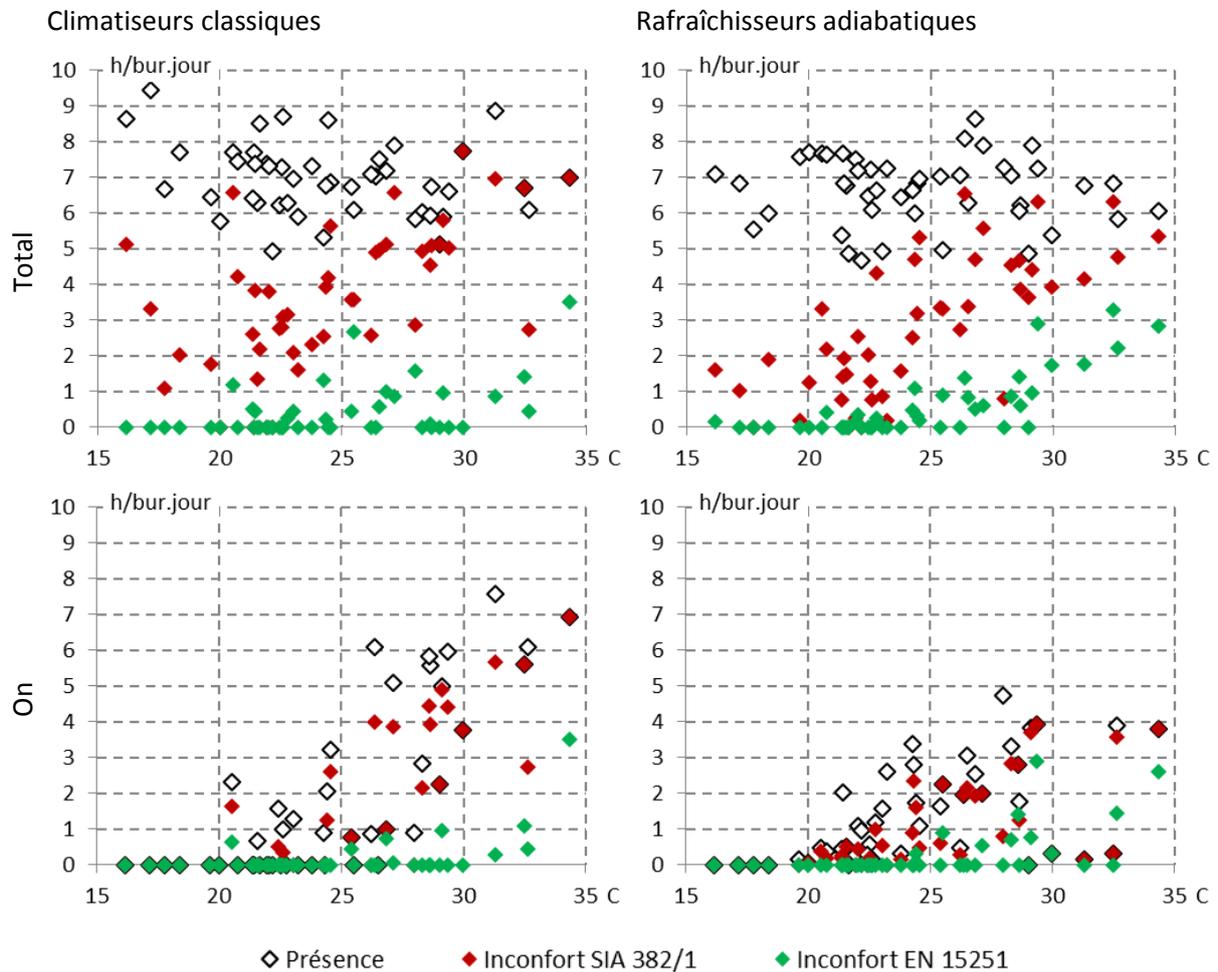


Figure 5-4 : Nombre d'heures journalières de présence et d'inconfort thermique (trop chaud), en fonction de la température extérieure maximale du jour (moyenne par bureau, phases 2 et 3). Total : moyenne sur les heures de présence; On : moyenne sur les heures de présence avec appareil enclenchés.

Selon la norme SIA 382/1, le nombre d'heures d'inconfort thermique dans les bureaux équipés de climatiseurs classiques est d'environ 2 à 3 h/jour pour une température météo atteignant un maximum journalier de 20°C. Cet inconfort atteint aux alentours de 5 à 6 h/jour (environ 75 à 85% du temps de présence) pour un maximum météo journalier de 30°C. La situation semble à peine meilleure pour les bureaux équipés de rafraîchisseurs adiabatiques, avec de l'ordre de 1 h/jour d'inconfort thermique en moins, surtout lors de météo clémente. Cette différence pourrait provenir de la possibilité accrue d'ouvrir les fenêtres avec ce type d'appareils, en particulier la nuit. Etant donnée la dispersion importante des valeurs, pour l'un et l'autre des appareils, cette interprétation doit cependant être prise avec précaution.

Par ailleurs (Figure 5-4 bas, en blanc), on observe l'enclenchement des appareils aux alentours d'une température maximale journalière de 20°C, avec une durée d'utilisation qui augmente avec la

température météo. A 30°C, elle atteint aux alentours de 6 h/j pour les climatiseurs classiques, contre 4 à 5 h/jour pour les rafraîchisseurs adiabatiques. Dans un cas comme dans l'autre, durant la majorité des heures d'enclenchement la température des bureaux reste cependant inconfortable selon la norme SIA 382/1 (en rouge).

La situation est nettement meilleure selon la norme adaptive EN 15251, tant sur le total des heures de présence que pendant les heures d'enclenchement des appareils.

5.2.a Résultats globaux

Les résultats sur l'ensemble de la période sont synthétisés dans le Tableau 5-2.

Pour les climatiseurs classiques :

- La présence moyenne est de 7.0 h/jour, dont 3.8 h/jour (54 %) dépassent la norme SIA 382/1, contre 0.4 h/jour (6 %) selon la norme EN 15251.
- L'utilisation moyenne des appareils est de 1.8 h/jour, dont 1.3 h/jour (73%) dépassent la norme SIA 382/1, contre 0.2 h/jour (10 %) selon la norme EN 15251.

Pour les rafraîchisseurs adiabatiques :

- une présence moyenne de 6.8 h/jour, dont 2.5 h/jour (37 %) dépassent la norme SIA 382/1, contre 0.4 h/jour (6 %) selon la norme EN 15251.
- une utilisation moyenne des appareils de 1.3 h/jour, dont 0.8 h/jour (63%) dépassent la norme SIA 382/1, contre 0.3 h/jour (5 %) selon la norme EN 15251.

Par ailleurs, la température chute en moyenne 0.2 h/jour en dessous de la norme SIA 382/1, ceci pour l'un et l'autre des appareils et uniquement lorsque ceux-ci sont off. Il en va de même pour la norme EN 15251.

		Climatiseur classiques			Rafraîchisseurs adiabatiques		
		Total	On	Off	Total	On	Off
Présence		7.0	1.8	5.1	6.8	1.3	5.5
SIA 382/1	trop froid	0.2	0.0	0.2	0.3	0.0	0.3
	confortable	3.0	0.5	2.5	3.9	0.5	3.4
	trop chaud	3.8	1.3	2.4	2.5	0.8	1.7
EN 15251	trop froid	0.2	0.0	0.2	0.2	0.0	0.2
	confortable	6.4	1.6	4.7	6.2	1.2	5.0
	trop chaud	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.3

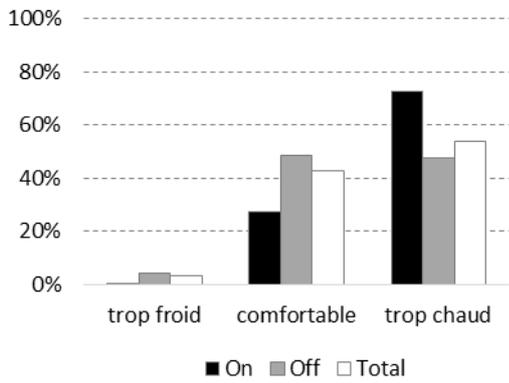
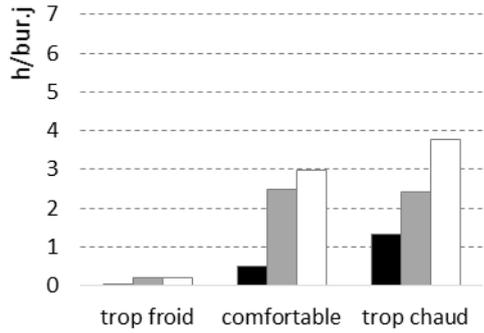
Total : moyenne sur les heures de présence

On : moyenne sur les heures de présence avec appareil enclenché

Off : moyenne sur les heures de présence avec appareil éteint

Tableau 5-2 : Nombre d'heures de présence et d'inconfort thermique sur l'ensemble des phases 2 et 3 (moyennes par bureau et par jour).

Climatiseurs classiques



Rafrâchisseurs adiabatiques

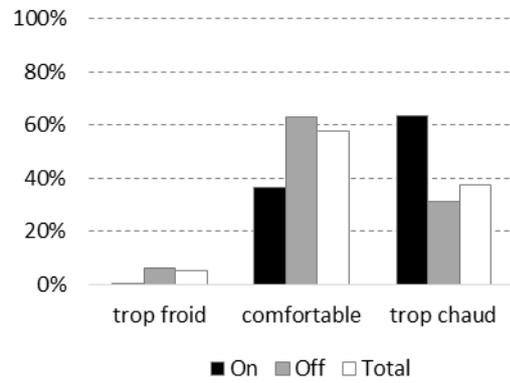
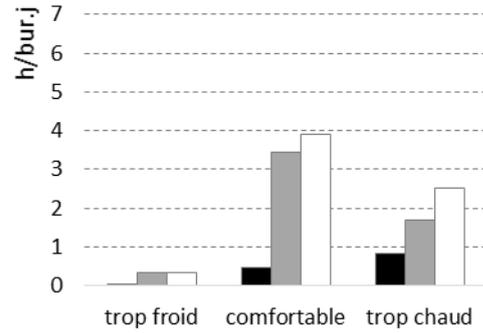
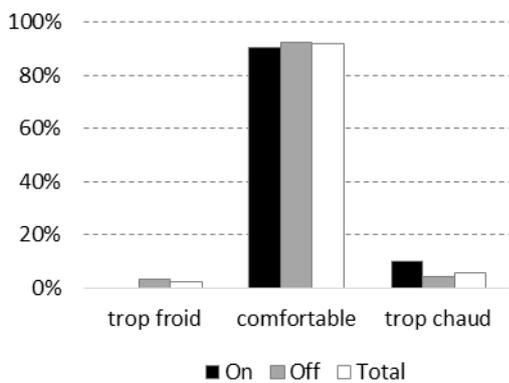
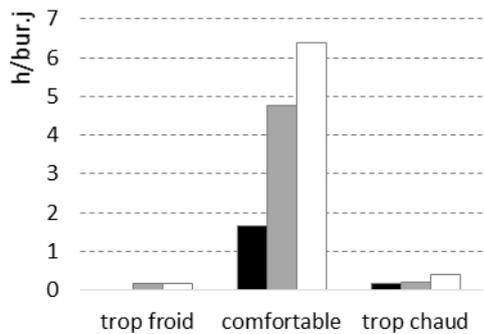


Figure 5-5 : Norme SIA 382/1, nombre d'heures et fréquences relatives de confort/inconfort, selon l'état des appareils (on, off, total). Moyennes des bureaux, phases 2 et 3.

Climatiseurs classiques



Rafrâchisseurs adiabatiques

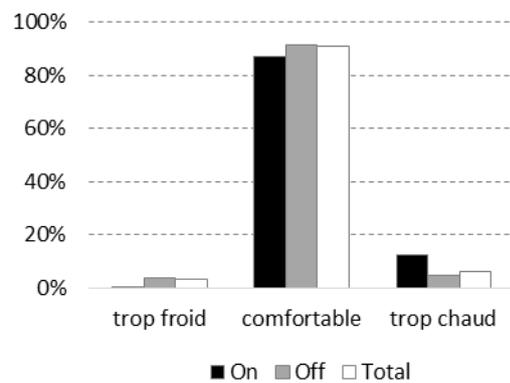
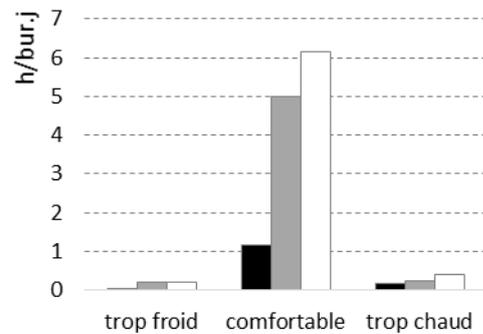


Figure 5-6 : Norme EN 15251, nombre d'heures et fréquences relatives de confort/inconfort, selon l'état des appareils (on, off, total). Moyennes des bureaux, phases 2 et 3.

Pour l'une et l'autre des normes, les résultats pour l'ensemble de la période sont repris dans la Figure 5-5 et la Figure 5-6 : i) en nombre moyen d'heures de confort/inconfort ; ii) en fréquences relatives de confort/inconfort. On remarque sur la forme des histogrammes la différence notable entre ces deux indicateurs, en particulier pour les états on/off des appareils. En effet, dans ces deux cas la fréquence de confort/inconfort est relative à la durée moyenne d'utilisation (on) ou de non-utilisation (off) des appareils, et non à la durée moyenne de présence. Ceci se voit particulièrement bien dans le cas de la norme EN 15251 (Figure 5-6), par exemple pour les climatiseurs : par rapport à la durée totale de présence (7.0 h/jour), le confort est atteint de l'ordre de 90% du temps (6.4 h/jour) contre 6% du temps où il fait trop chaud (0.4 h/jour) ; par rapport à la faible durée d'utilisation (1.8 h/jour), le confort est également atteint 90% du temps (1.6 h/jour) contre 10% du temps où il fait trop chaud (0.2 h/jour), ce qui ne doit pas occulter que ces durées restent toutes les deux faibles en valeur absolue.

5.3 Humidité relative et notion de confort

Comme il a déjà été mentionné, le confort est une sensation subjective qui fait intervenir de nombreux paramètres dont l'humidité relative de l'air. Il est généralement admis que l'humidité relative n'a en réalité que peu d'influence sur la sensation de confort tant qu'elle est comprise entre 30% et 70% (Fanger, 1970).

La Figure 5-7 présente la répartition des humidités relatives de l'air au sein des bureaux au cours des différentes phases. Les bureaux équipés du même dispositif de refroidissement pendant les phases 2 et 3 sont représentés sur le même schéma. Il y a ainsi un graphique pour tous les bureaux lors de la phase 1, un graphique pour les bureaux disposant d'un rafraîchisseur adiabatique en phases 2 et 3 et un graphique pour les bureaux disposant d'un climatiseur classique en phases 2 et 3.

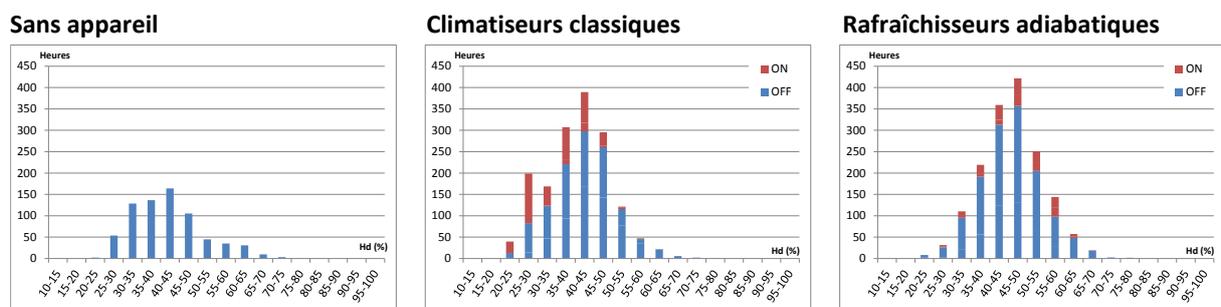


Figure 5-7 : Nombre d'heures contenues dans chaque classe d'humidité relative pendant la présence des usagers au cours de la phase 1 (gauche), dans les bureaux équipés d'un climatiseur classique au cours des phases 2 et 3 (milieu), dans les bureaux équipés d'un rafraîchisseur adiabatique au cours des phases 2 et 3 (droite) lorsque les appareils sont éteints (bleu) et lorsqu'ils sont allumés (rouge)

Au cours de la phase 1, l'humidité relative au sein des différents bureaux est comprise entre 25% et 70%. Le nombre d'heures où l'humidité est inférieure à 30% étant peu important, la phase 1 peut être considérée comme ayant une humidité relative « normale ». Il en est de même pour les bureaux équipés d'un rafraîchisseur adiabatique au cours des phases 2 et 3. L'humidité relative de ces bureaux varie entre 20% et 70%, mais le nombre d'heures inférieures à 30% étant faible, l'humidité relative est considérée comme « normale ». L'humidité relative des bureaux équipés d'un climatiseur classique est également comprise entre 20% et 70%. Cependant, les valeurs inférieures à 30% sont

nombreuses et ne peuvent pas être négligées. Dans ce cas, l'humidité relative peut avoir une influence sur le confort des personnes.

La Figure 5-7 nous permet aussi de remarquer une grande différence entre les bureaux équipés de climatiseurs classiques et ceux équipés de rafraîchisseurs adiabatiques au cours des phases 2 et 3. Lorsque les appareils sont éteints, il n'existe pas de différence entre les bureaux et l'humidité relative semble suivre une loi de Gauss (ou loi normale). Lorsque les climatiseurs sont en marche, l'humidité relative de l'air de la pièce est quasiment toujours inférieure à 50% et peut même atteindre les 20-25%. Lorsque les rafraîchisseurs adiabatiques fonctionnent, les valeurs d'humidité relative sont plus dispersées mais sont quasiment toujours supérieures à 35% et peuvent atteindre 65%. Ainsi les rafraîchisseurs adiabatiques humidifient l'air tout en restant dans des humidités relatives « normales » tandis que les climatiseurs classiques tendent à assécher l'air jusqu'à atteindre des valeurs d'humidité relatives en dessous de 30% ce qui peut causer des problèmes de santé.

Etant donné ce qui précède et pour des raisons de simplification, les analyses se basent principalement sur la température au sein des bureaux en considérant que l'humidité n'a globalement pas un effet très important sur le confort.

PARTIE 6 Perception et satisfaction des usagers

Cette dernière partie du travail se concentre sur les questionnaires remplis par les occupants au cours de cette étude. La perception et la satisfaction des usagers vis-à-vis des différents dispositifs de refroidissement sont présentées. On étudie dans un premier temps le ressenti des usagers tout au long de l'étude, puis dans un second temps, on analyse les questionnaires globaux remplis à la fin de l'expérience.

6.1 Perception des usagers pendant l'expérience

Pour rappel, tout au long de l'étude les usagers complètent une fiche, à différents moments de la journée, pour indiquer i) comment ils se sentent et ii) comment ils aimeraient se sentir (Annexe 7). L'échelle des ressentis utilisée est la suivante :

- -3 très froid,
- -2 froid,
- -1 frais
- 0 agréable, neutre (ni chaud ni froid),
- +1 légèrement chaud,
- +2 chaud,
- +3 très chaud.

6.1.a Ressentis versus souhaits

De façon très générale, quelles que soient la phase et l'utilisation des appareils, les occupants sont satisfaits et considèrent la température de leur bureau comme agréable 55% du temps, ils ont légèrement chaud 20% du temps, ont chauds ou trop chaud 13% du temps, frais 10% du temps et froid ou trop froid 2% du temps (Figure 6-1).

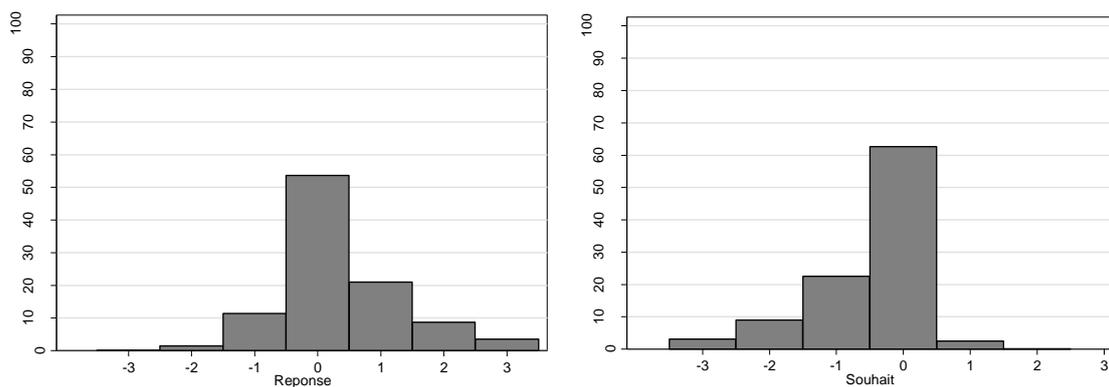


Figure 6-1 : Fréquence (%) des ressentis réels (gauche) et des ressentis souhaités (droite) des usagers

Concernant le ressenti souhaité des personnes, la question a été interprétée différemment. En effet, il est possible de constater une certaine symétrie entre comment les gens se sentent et comment ils voudraient se sentir. Lorsqu'ils ont trop chaud (+3), les gens ont tendance à dire qu'ils voudraient avoir trop froid (-3). En réalité ils ne veulent pas avoir trop froid mais plus froid. Il est difficile de tirer

des conclusions de ces réponses si ce n'est qu'en majorité les gens veulent se sentir neutre (60%) ou frais (20%) (Figure 6-1).

6.1.b Comparaison entre les phases de l'expérience

Nous avons réalisé un test du χ^2 afin de savoir s'il existe une différence significative des ressentis selon les phases, et en effet il y a une différence au seuil de 1%. D'après la Figure 6-2, les occupants sont plus satisfaits en phases 2 et 3 qu'en phase 1 (respectivement 55%, 62% et 45% de votes neutres), malgré que la phase 2 soit la phase la plus chaude. Ils se plaignent moins de la chaleur et légèrement plus du froid lorsque les bureaux sont équipés d'appareils de refroidissement.

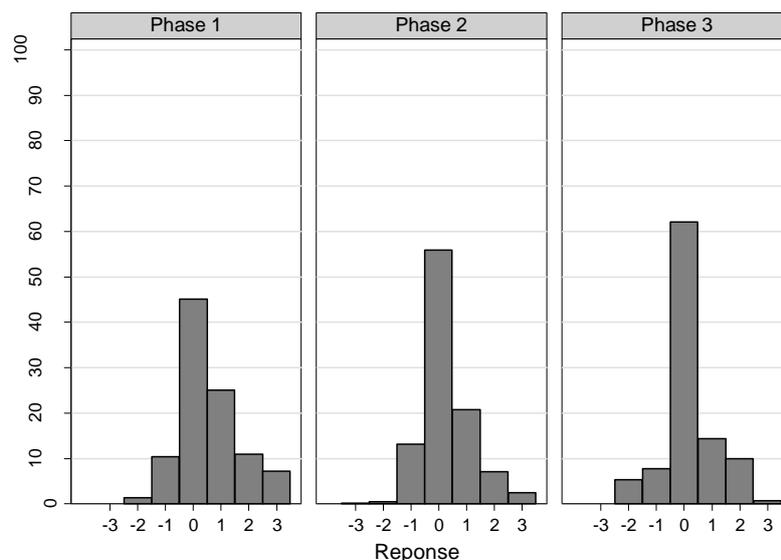


Figure 6-2 : Fréquence (%) des ressentis selon la phase

6.1.c Comparaison entre personnes proches et éloignées de l'appareil

Cette analyse concerne les ressentis des personnes dont la place de travail est équipée d'appareils de mesures, et donc vers lesquelles l'appareil de rafraîchissement doit être tourné, et les ressentis des personnes dont la place de travail n'est pas équipée d'appareils de mesures.

Lorsque les dispositifs de refroidissement sont éteints il n'existe aucune différence de ressentis entre les deux groupes. Au contraire, il existe une différence au seuil de 1% lorsque ceux-ci sont allumés. Les personnes qui sont censées avoir l'appareil de rafraîchissement tourné vers elles sont moins satisfaites et se plaignent plus de la chaleur et du froid (Figure 6-3). Le fait qu'elles aient plus froid peut s'expliquer car elles se situent dans le flux d'air de l'appareil. Le fait qu'elles aient plus chaud peut s'expliquer par le fait que ce sont elles qui décident d'allumer l'appareil et que cela peut signifier qu'elles ont chaud. Ou alors, disposant d'un appareil en fonctionnement, elles ont des attentes de confort plus grandes.

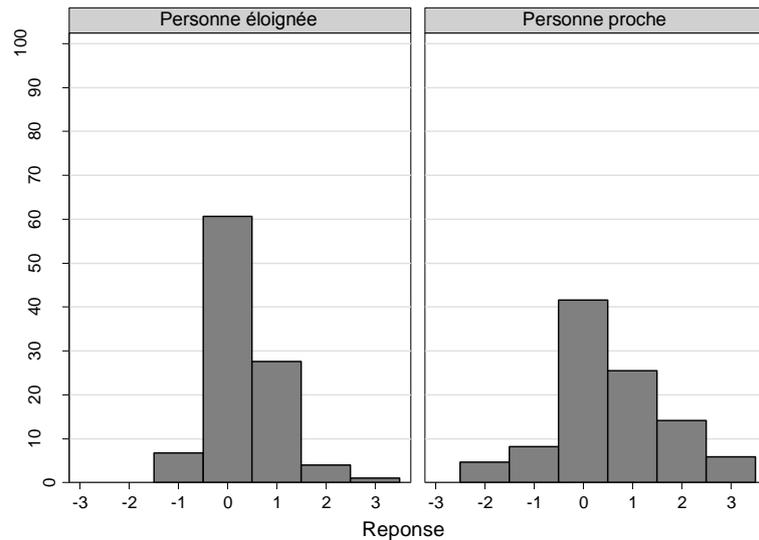


Figure 6-3 : Fréquence (%) des ressentis pour les personnes qui n’ont pas l’appareil de refroidissement tourné vers elles (gauche) et pour celles qui ont l’appareil de refroidissement tourné vers elles (droite)

6.1.d Comparaison entre les deux types d’appareils

Cette analyse concerne uniquement les personnes qui ont l’appareil dirigé vers elles (en phases 2 et 3). La Figure 6-4 présente la fréquence relative des ressentis pour les personnes équipées d’un climatiseur classique et celles équipées d’un rafraîchisseur adiabatique, lorsque les appareils sont éteints et lorsqu’ils sont allumés. Lorsque les appareils ne sont pas enclenchés, le ressenti est relativement proche pour tous les utilisateurs : environ 15% du temps une sensation légèrement froid à froid, 60% du temps une sensation neutre, et 25% du temps une sensation de légèrement à très chaud.

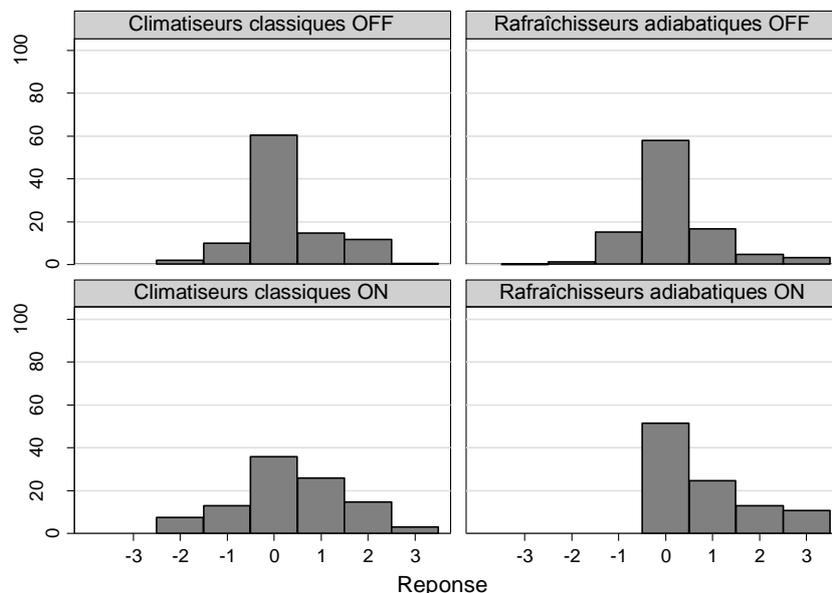


Figure 6-4 : Fréquence (%) des ressentis pour les personnes équipées d’un climatiseur classique (gauche) et celles équipées d’un rafraîchisseur adiabatique (droite), lorsque les appareils sont éteints (haut) et lorsqu’ils sont allumés (bas)

Il existe une différence significative des ressentis lorsque les dispositifs sont allumés, en particulier en ce qui concerne la sensation de froid. En effet, les usagers ne se plaignent pas du froid lorsque les

rafraîchisseurs adiabatiques sont allumés, alors qu’avec les climatiseurs classiques ils considèrent qu’il fait frais ou froid 20% du temps. En ce qui concerne le chaud, avec les climatiseurs ils ont de légèrement à très chaud 43% du temps, et très chaud 3% du temps ; avec les rafraîchisseurs ces valeurs sont de 48% et 11%.

A première vue, ces valeurs diffèrent des valeurs issues des normes, via les mesures de température sur les places travail (Chapitre 5.2.a). Dans ce dernier cas, aucun inconfort de froid n’était manifeste avec les appareils enclenchés. Par ailleurs, à l’inverse de ce qui ressort des ressentis, l’inconfort de chaud y était un peu plus marqué pour les climatiseurs que pour les rafraîchisseurs adiabatiques. A y regarder de plus près (Figure 6-5), il existe cependant pour le chaud une corrélation remarquable entre le ressenti des usagers et la mesure d’inconfort analysée selon les normes. A ce propos, la norme SIA 382/1 a tendance à refléter l’inconfort ressenti des usagers dans toute la gamme « légèrement à très chaud » (notes 1-3). La norme EN 15251 (catégorie III) reflète quant à elle le seul ressenti « très chaud ». Dans les deux cas, la fréquence d’inconfort donnée par la norme surpasse cependant la valeur du ressenti d’un facteur 1.5 environ.

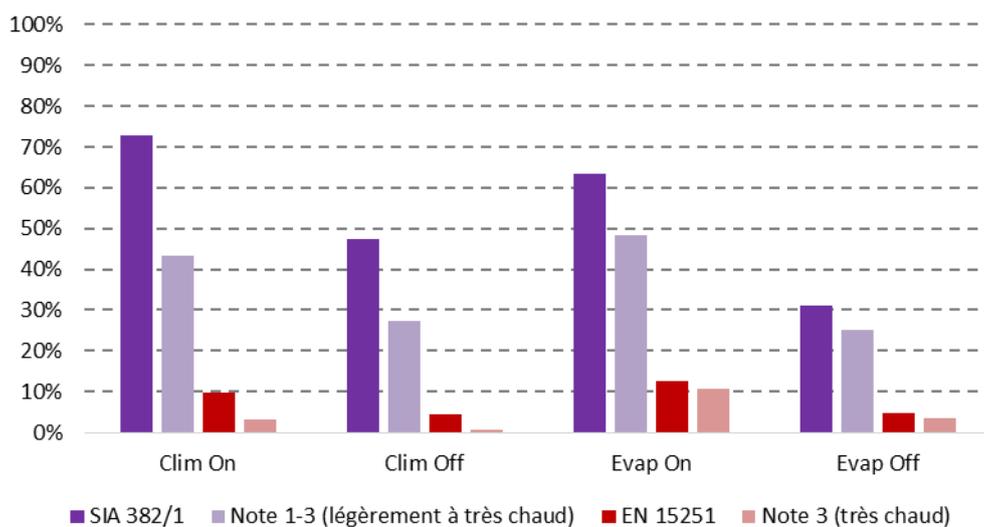


Figure 6-5 : Fréquence de surchauffe des places de travail selon i) les normes et mesures de température ; ii) le ressenti des usagers.

6.1.e Réponses simulées en fonction de la température intérieure

Sur la base des réponses aux questionnaires des phases 2 et 3, nous avons réalisé un modèle statistique de type probit (logiciel Stata), permettant de calculer les probabilités de réponses de chaque ressenti en fonction de la température intérieure, de la température moyenne des fenêtres et du type de dispositif de refroidissement, lorsque ceux-ci sont allumés ou éteints. Ces fonctions de probabilité sont visibles en

Annexe 19. Lorsque les appareils sont éteints les deux dispositifs présentent les mêmes probabilités de réponses. Lorsqu'ils sont allumés, la probabilité que la réponse soit inférieure ou égale à 0 est plus faible pour les rafraîchisseurs adiabatiques que pour les climatiseurs classiques, et inversement pour les réponses supérieures à 0. Dans tous les cas, la probabilité de répondre 0 est la plus élevée. Cela confirme les fréquences vues au paragraphe précédent.

Sur la base de ce modèle, nous pouvons calculer les réponses moyennes des ressentis en fonction de la température à la place de travail (Figure 6-6). Il n'est pas très juste de réaliser des moyennes sur une variable qualitative (le ressenti). Cependant, Fanger (1970) ayant adopté cette méthode, nous en avons fait de même, afin de comparer nos valeurs aux siennes.

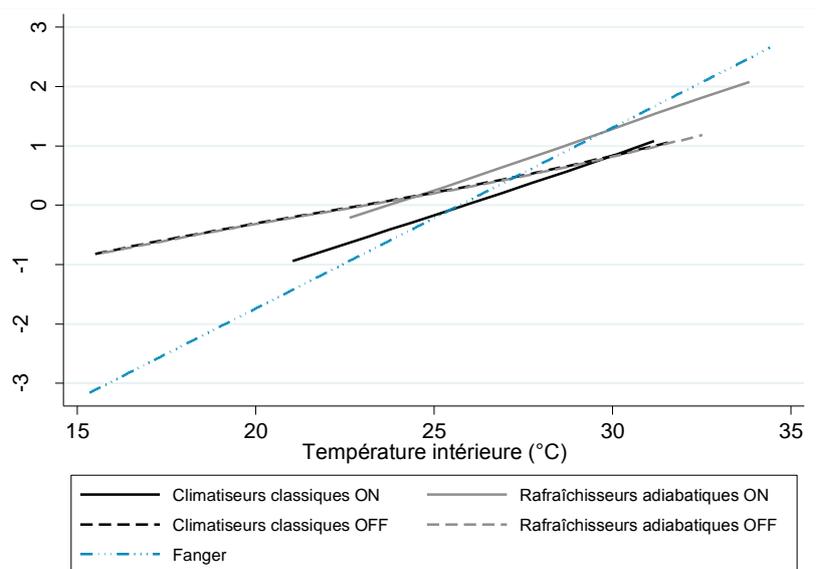


Figure 6-6 : Réponses moyennes simulées selon le modèle probit en fonction de la température intérieure (avec une température moyenne des fenêtres fixe) et selon l'expérience de Fanger (1970).

Lorsque les appareils sont éteints, les ressentis sont les mêmes pour les deux types de dispositifs. Les deux droites sont superposées. Les ressentis ne varient que de -1 à 1. En effet, lorsque les appareils ne sont pas utilisés, les personnes jugent la température comme neutre la majorité du temps. Lorsque les appareils sont allumés, la pente des courbes est plus forte. Comme précédemment, il y a deux explications possibles : soit les usagers ont des plus grandes attentes et ils sont donc moins indulgents, soit les appareils sont allumés quand il fait plus chaud, et les usagers ont donc plus chaud. La différence de ressentis entre les deux dispositifs est significative au seuil de 1%. Pour une même température à la place de travail, les personnes qui disposent d'un rafraîchisseur adiabatique ont plus chaud que celles équipées d'un climatiseur classique. Lorsque les températures sont élevées les climatiseurs classiques permettent un meilleur confort, tandis que lorsque les températures sont plus basses, ce sont les rafraîchisseurs adiabatiques qui permettent un meilleur confort. Il est intéressant de remarquer que les occupants jugent la température comme agréable à 24°C lorsque les appareils sont éteints ou lorsqu'ils utilisent le rafraîchisseur adiabatique, mais lorsqu'ils utilisent le climatiseur classique la température agréable s'élève à 26°C.

Les conditions de l'étude de Fanger (1970), concernant l'habillement et l'activité des personnes, sont similaires aux nôtres. Par comparaison, on peut voir que ses sujets sont nettement moins indulgents

que les nôtres. Cependant, les sujets étudiés par Fanger sont placés dans une chambre climatique, ce qui constitue une différence majeure avec notre étude in-situ.

6.2 Satisfaction générale – climatisation classique, climatisation par évaporation ou absence de système

6.2.a Satisfaction et besoin de refroidissement

A la fin de l'expérience les occupants remplissent un questionnaire constitué de questions en rapport avec les différentes phases de l'expérience (Annexe 6) et notamment sur leurs conditions de travail avant l'étude. Il a été demandé aux occupants si, de manière générale, ils étaient satisfaits de la température ambiante sur leur lieu de travail en été. Cette question a été posée concernant les conditions initiales de l'expérience, mais la réponse se faisant à la fin de l'étude, elle a pu être influencée par la suite de l'expérience. 50% des personnes interrogées répondent que « oui » elles sont satisfaites par les conditions internes de leur bureau en été et les autres 50% répondent que « non » ils ne sont pas satisfaits.

Malgré cette répartition de la satisfaction des usagers, la majorité des personnes interrogées pense que le refroidissement de leur bureau en été est nécessaire. La Figure 6-7 présente les réponses, sur une échelle allant de 1 à 7 (1 : pas besoin ; 7 : indispensable), à la question sur le besoin de refroidissement des bureaux en été.

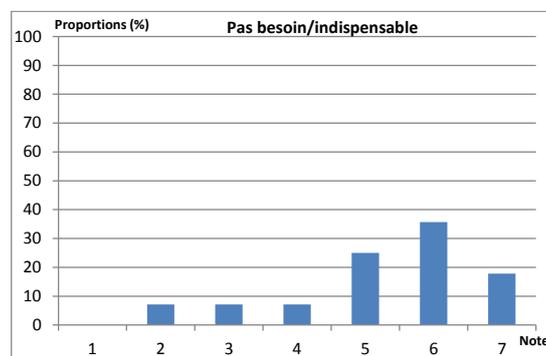


Figure 6-7 : Répartition des réponses à la question sur le besoin de refroidissement des bureaux en été (1 : pas besoin ; 7 : indispensable)

Les personnes répondent majoritairement 6, 5 et 7, avec respectivement 36%, 25% et 18% des réponses. Ainsi, bien que la moitié des occupants interrogés se disent satisfaits des conditions intérieures de leur bureau, le besoin de refroidissement est tout de même considéré à 79% comme nécessaire, voire indispensable.

A la fin de la phase 1, il est par ailleurs demandé aux occupants de donner leur avis sur la température et la qualité de l'air de leur bureau sans système de refroidissement (Annexe 5). La même chose leur est demandée à la fin des phases 2 et 3 après utilisation des dispositifs de refroidissement avec en plus un avis sur le bruit et la rapidité de l'effet (Annexe 6).

6.2.b Température intérieure

La température a été évaluée par les occupants d'un point de vue de la sensation chaud/froid, de sa stabilité, du confort qu'elle procure et de la rapidité de l'effet.

La Figure 6-8 présente les réponses des occupants à deux de ces critères, la sensation chaud/froid et la rapidité de l'effet. La sensation chaud/froid a été notée sur une échelle de 1 à 7 (1 : trop chaud ; 7 : trop froid) sans système de refroidissement, avec les climatiseurs classiques et avec les rafraîchisseurs adiabatiques. La rapidité de l'effet a également été évaluée sur une échelle de 1 à 7 (1 : pas d'effet ; 7 : rapide) pour les deux types d'appareils.

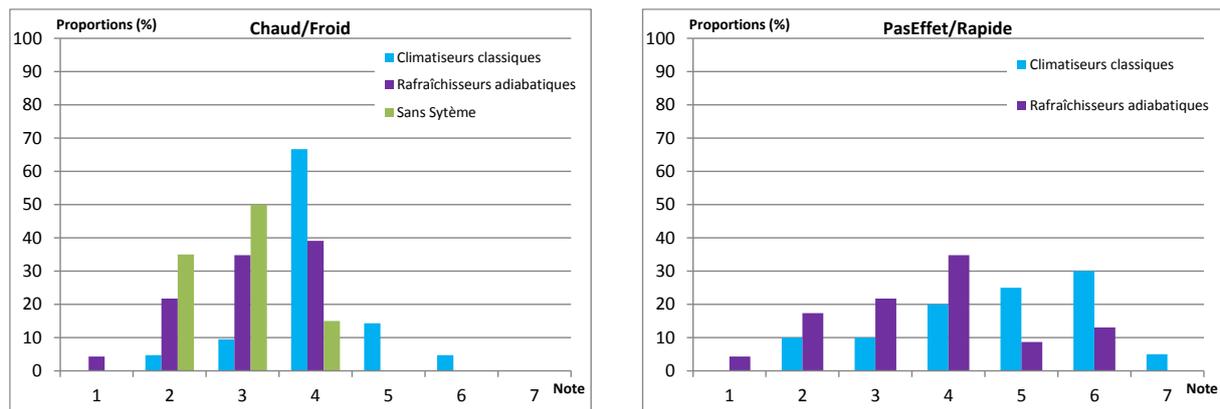


Figure 6-8 : Répartition des réponses de la sensation chaud/froid (1 : trop chaud ; 7 : trop froid) sur le graphique de gauche et de la rapidité de l'effet de refroidissement (1 : pas d'effet ; 7 : rapide) sur le graphique de droite, sans système de refroidissement (vert), avec les climatiseurs classiques (bleu) et avec les rafraîchisseurs adiabatiques (violet)

Sans système de refroidissement la majorité des personnes interrogées ont légèrement chaud ou chaud (50%, 35%). Avec les rafraîchisseurs adiabatiques, 40% des usagers jugent la température agréable, 35% ont légèrement chaud et 22% ont chaud. Avec les climatiseurs classiques, plus de 65% des usagers considèrent la température comme agréable et 19% ont froid. Pour les deux types d'appareils, la forme de l'histogramme est similaire à ceux obtenus à partir des ressentis notés tout au long de l'expérience (Figure 6-4). Cependant, contrairement aux ressentis notés en continu, il y a ici plus de votes pour le point neutre avec le climatiseur classique qu'avec le rafraîchisseur adiabatique.

En ce qui concerne l'effet de refroidissement, les usagers semblent le trouver plus rapide dans le cas des climatiseurs classiques, 35% ont mis des notes entre 6 et 7, que dans le cas des rafraîchisseurs évaporatifs, seulement 13% ont mis des notes entre 6 et 7. Il y a même 4% des usagers qui estiment que le rafraîchisseur adiabatique n'a aucun effet.

Concernant la stabilité de la température et le confort qu'elle procure, les réponses sont très dispersées et il n'y a pas de tendances claires qui se dégagent. Les graphiques des réponses sont visibles en Annexe 21.

6.2.c Qualité de l'air

La qualité de l'air a été évaluée par les occupants d'un point de vue de la sensation sec/humide, air frais/étouffant, air sain/malsain, air stable ou courants d'air, mauvaises odeurs ou non.

La Figure 6-9 présente les réponses des occupants à deux de ces critères, la sensation sec/humide et la présence ou non de mauvaises odeurs en fonction de l'appareil utilisé.

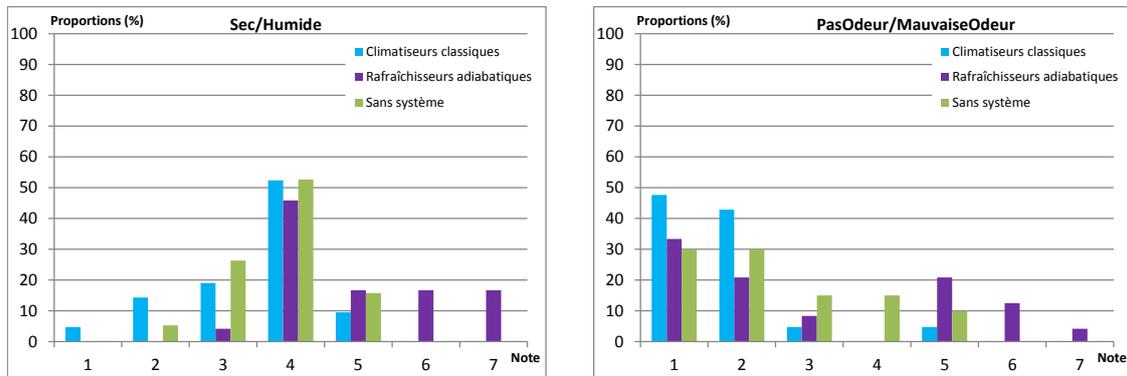


Figure 6-9 : Répartition de la sensation sec/humide (1 : sec ; 7 : humide) sur le graphique de gauche et sur la présence ou non de mauvaises odeurs (1 : pas d'odeurs ; 7 : mauvaises odeurs) sur le graphique de droite, sans système de refroidissement (vert), avec les climatiseurs classiques (bleu) et avec les rafraîchisseurs adiabatiques (violet)

Sans utilisation de systèmes de refroidissement, les occupants trouvent en majorité, que l'air est neutre, c'est-à-dire ni sec ni humide. De façon globale, les gens trouvent également l'air neutre avec l'utilisation des dispositifs de refroidissement. Il existe cependant une importante différence d'appréciation entre les climatiseurs classiques et les rafraîchisseurs adiabatiques. Ainsi, l'air est jugé plutôt sec avec l'utilisation des climatiseurs classiques et plutôt humide avec les rafraîchisseurs adiabatiques.

Concernant la présence de mauvaises odeurs, les réponses sont assez dispersées lorsqu'aucun appareil n'est utilisé. Les notes varient de 1 à 5, avec tout de même une majorité de personnes considérant qu'il n'y a pas d'odeurs. Les avis sont également très divergents sur les odeurs que peuvent émettre les rafraîchisseurs évaporatifs. 62% des occupants ont mis des notes entre 1 et 3 et considèrent donc qu'il n'y a pas vraiment d'odeurs, mais les 32% restants ont noté entre 5 et 7 et trouvent donc qu'il y a de mauvaises odeurs. Au contraire, plus de 90% des occupants disent que la climatisation classique n'émet pas d'odeurs (notes 1 et 2).

Les réponses sur les autres critères étant très dispersées, il est difficile d'en tirer des conclusions. Les graphiques sont visibles en Annexe 20.

6.2.d Bruit

La nuisance due au bruit lors du fonctionnement des appareils de refroidissement portables a été évaluée sur une échelle de 1 à 7, allant de imperceptible à insupportable. Les résultats sont présentés sur la Figure 6-10.

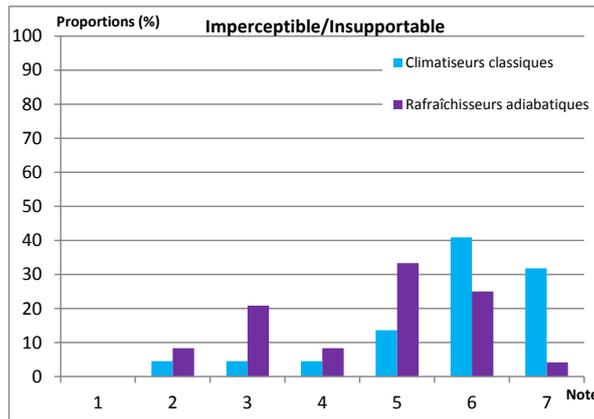


Figure 6-10 : Réponses sur le niveau de bruit (1 : imperceptible ; 7 : insupportable) pour les climatiseurs classiques (bleu) et pour les rafraîchisseurs adiabatiques (violet)

Les deux appareils semblent, d'après les usagers, spécialement bruyants, en particulier les climatiseurs classiques. En effet, 73% des usagers jugent le bruit des climatiseurs classiques insupportable (notes 6 et 7), contre seulement 29% pour les rafraîchisseurs adiabatiques.

6.2.e Classement des dispositifs

A la fin de l'expérience il a été demandé aux usagers de classer par ordre de préférences les propositions suivantes : aucun dispositif, climatiseur classique portable, rafraîchisseur adiabatique portable et système de climatisation centralisé. La Figure 6-11 présente les résultats du classement.

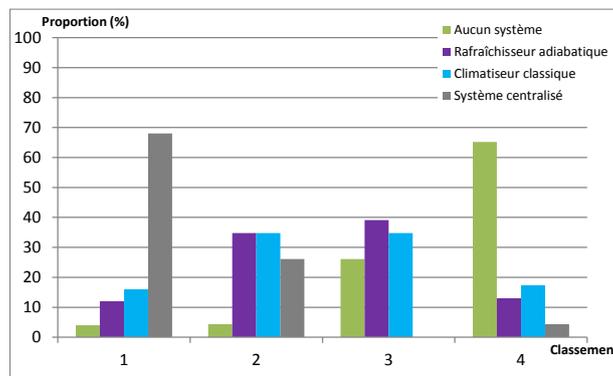


Figure 6-11 : Classement par préférences des utilisateurs des différentes options de refroidissement

Un système de climatisation centralisée est classé en 1^{er} et donc préféré à toutes les autres options par 68% des utilisateurs. A noter cependant que, contrairement aux autres, cette option n'a pas été testée par les usagers. Les climatiseurs classiques portables et les rafraîchisseurs adiabatiques portables sont classés ex-aequo en 2nde et 3^{ème} positions avec environ 35% de votes chacun. Une absence de système est classée en 4^{ème} et dernière position par 65% des usagers.

Synthèse et conclusion

Cette étude a porté sur l'évaluation in situ de l'utilisation de deux types d'appareils portables de refroidissement : des climatiseurs classiques (production de froid par machine de froid) et des rafraîchisseurs adiabatiques (production de froid par évaporation d'eau).

Au niveau de leur comportement intrinsèque, les deux dispositifs de refroidissement forment un cône d'air frais, avec une vitesse de l'air qui diminue avec la distance à l'appareil. Au niveau des prestations, ils se différencient comme suit :

- En mode refroidissement, et selon l'intensité de ventilation sélectionnée, les climatiseurs consomment 800 – 1400 W électriques, contre 28 – 66 W pour les rafraîchisseurs adiabatiques (facteur 20 – 30).
- Pour une température à l'entrée de 17 – 28°C, et lorsqu'ils sont en mode refroidissement, les climatiseurs ont une température de ventilation bien plus basse (5 – 15°C) que les rafraîchisseurs adiabatiques (15 – 22°C).
- La puissance frigorifique associée est de 1 – 2.2 kW pour les climatiseurs, contre 0.1 – 1.5 kW de froid pour les rafraîchisseurs (en fonction du potentiel d'humidification de l'air).

Les appareils en question ont été testés dans deux groupes de 7 bureaux chacun, situés en façade sud d'un bâtiment de l'Université de Genève, construit en 1963. Réputé pour avoir des hautes températures estivales, le bâtiment se caractérise notamment par de larges fenêtres pivotantes, formées par deux simples vitrages munies entre eux d'un store à lamelle, qui induisent d'importants gains solaires.

L'expérience couvre la période du 4 juillet au 25 septembre 2011, dont 14 jours initiaux (phase 1) sans appareils de refroidissement, puis 60 jours (phases 2 et 3) avec appareils de refroidissement à disposition (avec échange des deux types d'appareils entre les deux groupes de bureaux entre les phases 2 et 3). Un appareillage de mesure relativement complet (162 sondes, avec un pas d'acquisition de 10 minutes) permet un suivi fin de la présence des usagers, de l'utilisation des appareils, des conditions hydro-thermiques au niveau des places de travail, ainsi que de l'ouverture des fenêtres.

Pour deux jours types, et pour deux places de travail munies chacune d'un type d'appareil, on fait les observations suivantes :

- En milieu de journée, avec un ensoleillement de l'ordre de 750 W/m², la température des vitrages des bureaux grimpe aux alentours de 40°C malgré l'utilisation des stores. Cela met en évidence la piètre utilité de stores placés entre vitrage (à l'instar de stores intérieurs).
- Sans appareils de refroidissement à disposition, et pour une journée avec une température extérieure variant entre 17 et 27°C, la température intérieure (au niveau d'une place de travail) varie grosso modo entre 22°C en début de matinée et 29°C en fin d'après-midi, pour autant que la porte du bureau donnant sur le couloir reste ouverte pendant la nuit (donnant accès à la masse thermique du bâtiment) ; lorsque ceci n'est pas le cas, la température matinale ne descend pas en dessous de 27°C.

- Lors d'une journée similaire, dans le bureau muni d'un climatiseur l'utilisateur enclenche l'appareil lors de son arrivée en milieu de matinée, alors que la température intérieure est encore à 27°C. Le climatiseur, qui pulse de l'air est à 13°C, permet de maintenir la température du bureau aux alentours de 26°C, jusqu'à l'arrêt de l'appareil vers 20h. Dans le bureau muni d'un rafraîchisseur adiabatique, l'utilisateur n'enclenche l'appareil qu'en début d'après-midi, alors que intérieure est encore aux alentours de 27°C, mais que la température des vitrages commence à augmenter. Le rafraîchisseur, qui pulse de l'air est à 23°C, n'a pas d'effet significatif sur la température de la place de travail, qui continue de grimper jusqu'à un maximum de 29°C vers 18h.
- Bien qu'illustratifs du fonctionnement et de l'usage des deux types d'appareils dans le bâtiment en question, ces deux jours types ne doivent pas occulter l'usage différencié des appareils en fonction des divers bureaux et de la météo, en lien avec la gestion des mécanismes de rafraîchissement passif (ouverture nocturne des fenêtres et/ou des portes des bureaux).

Afin d'obtenir une vue d'ensemble de l'utilisation des appareils et de la prestation de confort les mesures sont analysée de façon statistique sur l'ensemble des bureaux et l'ensemble de la durée de l'expérience. On en sort les observations suivantes :

- Le taux d'enclenchement des appareils en fonction de la température extérieure est caractérisé par une fonction logistique. Celle-ci est plus étalée pour les rafraîchisseurs adiabatiques que pour les climatiseurs classiques : à 25°C extérieur, 50% des climatiseurs sont enclenchés, contre un peu moins de 30% des rafraîchisseur adiabatiques ; à 35°C extérieur, 100% des climatiseurs sont enclenchés, contre 80% des rafraîchisseur adiabatiques .
- Ainsi, sur l'ensemble de la période et pour une présence moyenne de 7 h/jour, les climatiseurs sont enclenchés en moyenne 1.8 h/jour, contre 1.3 h/jour pour les rafraîchisseurs adiabatiques.
- Lorsque les appareils de refroidissement ne sont pas à disposition, ou lorsqu'ils sont éteints, les deux groupes de bureaux présentent une signature énergétique semblable ; en moyenne, la température à l'intérieur des bureaux s'élève aux alentours de 25°C pour 20°C extérieur, et grimpe aux alentours de 31°C pour 35°C extérieur. Lorsque les appareils sont allumés (essentiellement au-dessus de 20°C extérieur), on note une signature plus plate pour les climatiseurs : aux alentours de 27°C pour 20°C extérieur, respectivement 29°C pour 35°C extérieur. Dans le cas des rafraîchisseurs adiabatiques, la signature reste très proche de celle des périodes sans enclenchement des appareils. La différence entre les deux types d'appareil pourrait provenir de l'accès limité à la ventilation naturelle dans le cas de la mise à disposition des climatiseurs classiques (une des deux fenêtres du bureau étant alors sellée). De façon générale, on note cependant une forte dispersion des points, qui varient de bureau en bureau. Cela pourrait notamment être dû à une gestion différenciée des fenêtres, ainsi que de l'ouverture nocturne des portes des bureaux qui donnent accès au couloir et à la masse thermique des bureaux situés en façade nord.
- Dans le cas du bâtiment en question (sans protection solaire efficace), les appareils portables de refroidissements (tant climatiseurs classiques que rafraîchisseurs adiabatiques) restent

insuffisants pour maintenir le confort thermique. Cependant, la comptabilisation des heures d'inconfort dépend fortement du type de norme utilisée. Dans le cas de la norme SIA 382/1, l'inconfort en chaud sur la période de mise à disposition des appareils s'élève en moyenne à 54% des heures de présence pour les bureaux munis de climatiseurs, contre 37% pour ceux qui sont munis de rafraîchisseurs adiabatiques. Comme expliqué ci-dessus, la différence pourrait provenir dans le premier cas de l'accès limité à la ventilation naturelle. Dans le cas de la norme adaptative EN 15251 catégorie III (valable pour des locaux non climatisés ni ventilés mécaniquement, avec un niveau de confort modéré accepté), l'inconfort thermique ne s'élève plus qu'à 6%, pour l'un ou l'autre des types d'appareil.

- Enfin, toujours selon les mesures, le confort hydrique semble majoritairement acquis, et ce pour les deux types d'appareils. Au niveau des places de travail, l'humidité relative pendant la présence des usagers se situe en effet majoritairement entre 30 et 70%, avec peu de différence entre les deux types d'appareils si ce n'est quelques incursions entre 20 et 30% dans le cas des climatiseurs classiques. L'absence d'incursions au-delà de 70% pour les rafraîchisseurs adiabatiques indique un bon brassage avec l'air de la pièce.

En complément aux mesures physiques, un questionnaire rempli 4 fois par jour permet de classer le ressenti des usagers sur une échelle de -3 à +3 (très froid, froid, frais, neutre, légèrement chaud, chaud très chaud). L'analyse des réponses se résume comme suit :

- Quelques différences apparaissent par rapport aux valeurs issues des mesures de température : lorsque les climatiseurs sont allumés, 20% du temps les usagers se plaignent légèrement du froid, ce qui ne ressort pas de la confrontation des mesures avec les normes ; par ailleurs, à l'inverse de ce qui ressort des mesures, l'inconfort de chaud y est un peu plus marqué pour les rafraîchisseurs adiabatiques que pour les climatiseurs.
- Pour la sensation de chaud, il existe cependant une corrélation remarquable entre le ressenti des usagers et la mesure d'inconfort analysée selon les normes. A ce propos, la norme SIA 382/1 a tendance à refléter l'inconfort ressenti des usagers dans toute la gamme « légèrement à très chaud » (notes 1-3). La norme EN 15251 (catégorie III) reflète quant à elle le seul ressenti « très chaud ». Cependant, dans les deux cas la fréquence d'inconfort donnée par la norme surpasse la valeur du ressenti, d'un facteur 1.5 environ.

Finalement, une appréciation générale des usagers en fin d'expérience donne les résultats suivants :

- En ce qui concerne le confort thermique, l'évaluation des deux types d'appareils suit globalement la même tendance que les ressentis notés tout au long de l'expérience. Par rapport à ces derniers, la sensation de chaud est cependant évaluée de façon plus forte pour les rafraîchisseurs adiabatiques, et au contraire plus faible pour les climatiseurs classiques.
- En ce qui concerne le confort hydrique, globalement satisfaisant selon les mesures au niveau des places de travail, 50% des usagers ressentent globalement l'air un peu à beaucoup trop sec avec les climatiseurs, contre 50% un peu ou beaucoup trop humide avec les rafraîchisseurs adiabatiques.
- Selon les usagers, les deux appareils semblent bruyants, en particulier les climatiseurs classiques. En effet, 73% des usagers jugent le bruit des climatiseurs classiques insupportable (notes 6 et 7 sur un total de 7), contre seulement 29% pour les rafraîchisseurs adiabatiques.

- Finalement, il a été demandé aux usagers de classer par ordre de préférences les propositions suivantes : aucun dispositif de rafraîchissement, climatiseur classique portable, rafraîchisseur adiabatique portable et système de climatisation centralisé. Le système de climatisation centralisée est choisi en 1^{ère} option par 68% des utilisateurs. A noter cependant que, contrairement aux autres options, celle-ci n'a pas été testée par les usagers. Les climatiseurs classiques portables et les rafraîchisseurs adiabatiques portables sont classés ex-aequo en 2^{ème} et 3^{ème} positions avec environ 35% de votes chacun. Une absence de système est classée en 4^{ème} et dernière position par 65% des usagers.

En conclusion, les points suivants peuvent être soulignés :

- Tout d'abord, les conditions expérimentales ont rendu cette étude complexe : nombre élevé de paramètres en jeu, de données à mesurer, aspect subjectif du confort estival et difficulté d'objectiver les ressentis.
- Malgré tout, la satisfaction des occupants par rapport au confort thermique estival obtenu par les deux types appareils portables a pu être évaluée par différentes méthodes, qui convergent vers une réelle sensation d'amélioration par rapport à la situation sans appareils, sans pour autant garantir un confort irréprochable.
- Ces appareils sont utilisés avec parcimonie lors de l'occupation, environ 20% du temps. Les consommations électriques spécifiques qui en découlent sont certainement faibles, principalement pour l'adiabatique du fait de la faible puissance électrique en jeu. Estimées grossièrement à 10 kWh/m².été pour le climatiseur portable et moins de 1 kWh/m².été pour l'adiabatique, elles sont certainement très en dessous de la consommation électrique spécifique de la climatisation centralisée. Si on renonce à un confort estival intégral, tout en améliorant de façon sensible le ressenti des occupants, ces appareils portables sont donc être une alternative intéressante à la climatisation centralisée, tant du point de vue énergétique qu'économique.

Références bibliographiques

(Adnot et al., 2004): Adnot J., Alvarez S., Klitsikas N. , Lopes C. , Orphelin M. , Sanchez F., Santamouris M. (2004). Cooling the Cities - Rafrâichir les villes. Ed : Presse des Mines, Paris, ISBN : 9782911762543, 280 p.

(Biddle, 2008): Biddle J. (2008), Explaining the spread of residential air conditioning, 1955–1980, Explorations in Economic History 45, pp. 402–423.

(Dumortier et.al., 2012): Dumortier R., Lang T., Schmutz B. (2012). Elektrizitätsbedarf fürs Kühlen in der Schweiz, Kampagne effiziente Kälte. Schweizerischer Verein für Kältetechnik (SVK), Zürich.

(EN 15251, 2007): CEN - Comité Européen de Normalisation (2007). Norme EN 15251 : Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique. 49p.

(Ecoheatcool, 2005): ECOHEATCOOL, Work package 2 (2005). The European Cold Market (Final Report). Principal authors: P. Dalin and A. Rubenhag. Ed: Euroheat & Power, Brussels.

(Fanger, 1970): Fanger P.O., (1970). Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill Book Company, New-York, 244p.

(Frederiksen et al., 2013): Frederiksen S., Werner S. (2013). District Heating and Cooling. Ed.: Studentlitteratur, Lund, ISBN-13: 978-9144085302, 588 p.

(Hitchin et al., 2013): Hitchin R., Pouta C., Riviere P. (2013). Assessing the market for air conditioning systems in European buildings, Energy and Buildings 58, pp. 355–362.

(Hollmuller et al., 2008): Hollmuller P., Gallinelli P., Lachal, B., Weber W. (2008). Coolshift: Rafrâichissement passif de bâtiments par ventilation déphasée et systèmes apparentés. Report. Office fédéral de l'énergie, Bern.

(Hollmullet et al., 2011): Hollmuller P., Hunziker S., Lachal B. (2011). Enjeux de la climatisation au niveau genevois et tour d'horizon de possibles alternatives. Groupe Energie, Institut Forel / Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève.

(IPCC, 2013): IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

(SIA 382/1, 2007): Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes (2007). Norme SIA 382/1 : Installations de ventilation et de climatisation – Bases générales et performances requises. 64p.

Annexes

Annexe 1 : Liste des appareils de refroidissement utilisés dans les différents bureaux pendant les phases 2 et 3	80
Annexe 2 : Informations données aux usagers quant à l'utilisation des rafraîchisseurs adiabatiques	81
Annexe 3 : Informations données aux usagers quant à l'utilisation des climatiseurs classiques	85
Annexe 4 : Dénomination détaillée des différentes mesures enregistrées	89
Annexe 5 : Premier questionnaire complété à la fin de la phase 1	90
Annexe 6 : Questionnaire rempli à la fin de l'expérience.....	91
Annexe 7 : Fiche de coches des ressentis (1 fiche par semaine).....	95
Annexe 8 : Valeurs des surfaces et des vitesses moyennes pour les différents appareils de refroidissement .	96
Annexe 9 : Vitesses de l'air (m/s) au niveau de la grille de ventilation pour les trois vitesses de ventilation (v1, v2, v3) pour le CL 550 et photographie de la grille de ventilation du CL 550.....	96
Annexe 10 : Vitesses de l'air (m/s) au niveau de la grille de ventilation pour les trois vitesses de ventilation (v1, v2, v3) pour le CL 1250 et photographie de la grille de ventilation du CL 1250	97
Annexe 11 : Vitesses de l'air (m/s) au niveau de la grille de ventilation pour les trois vitesses de ventilation (v1, v2, v3) pour le magicool et photographie de la grille de ventilation du magicool	97
Annexe 12 : Vitesses de l'air (m/s) au niveau de la grille de ventilation pour les trois vitesses de ventilation (v1, v2, v3) pour le mastercool et photographie de la grille de ventilation du mastercool	98
Annexe 13 : Explication détaillée des calculs effectués pour la caractérisation thermique et énergétique des appareils de refroidissement portables	98
Annexe 14 : Méthode utilisée afin de savoir si les appareils de refroidissement sont éteints ou allumés	101
Annexe 15 : Variables a et r et coefficients de corrélation R ² de l'équation de la fonction logistique pour les phases 2 et 3	101
Annexe 16 : Nombre d'heures où les appareils sont éteints ou allumés pendant la présence de l'utilisateur, taux d'enclenchement des appareils et taux d'enclenchement modélisé en fonction de la température intérieure et de la température extérieure, pour la phase 2 et la phase 3.	102
Annexe 17 : Signature énergétique (moyennes 10 minutes) pendant les phases 1, 2 et 3, lorsque les occupants sont présents	103
Annexe 18 : Description des catégories d'ambiance intérieure utilisées dans la norme EN 15251.....	104
Annexe 19 : Probabilités simulées des réponses en fonction de la température intérieure (température des fenêtres constante) selon le modèle probit	105
Annexe 20 : Réponses aux questions sur la qualité de l'air ; air sain ou malsain en haut à gauche (1 : sain ; 7 : malsain), air frais ou étouffant en haut à droite (1 : frais ; 7 : étouffant), satisfaction en bas à gauche (1 : satisfait ; 7 : insatisfait), stabilité de l'air en bas à droite (1 : stable ; 7 : instable)	107
Annexe 21 : Réponses aux questions sur la température ; stabilité de la température à gauche (1 : stable ; 7 : instable), confort qu'elle procure à droite (1 : confortable ; 7 : inconfortable).....	107

Annexe 1 : Liste des appareils de refroidissement utilisés dans les différents bureaux pendant les phases 2 et 3

	Phase 2	Phase 3
220	Magicool	CL 1250
221	CL 1250	Magicool
224	CL 1250	Mastercool
227	Mastercool	CL 1250
233	Magicool	CL 1250
235	CL 1250	Magicool
326	Mastercool	CL 1250
336	CL 1250	Mastercool
420	CL1250	Magicool
421	Mastercool	CL 550
423	Magicool	CL 1250
434	CL 550	Mastercool

Annexe 2 : Informations données aux usagers quant à l'utilisation des rafraîchisseurs adiabatiques



Test d'une alternative à la climatisation des bureaux

Rafraîchisseur évaporatif: **Magicool**

Comment fonctionne le rafraîchissement évaporatif ?

Le rafraîchissement évaporatif s'inspire du processus naturel de la brise marine. Celle-ci doit sa fraîcheur à un mouvement d'air chaud en contact avec une surface d'eau, dont une partie s'évapore. L'évaporation absorbe de l'énergie et rafraîchit donc le flux d'air.

Un appareil de rafraîchissement évaporatif consiste en un ventilateur qui force l'air de la pièce au travers d'un évaporateur à grande surface d'échange, qui est maintenu humide grâce une petite pompe reliée à un réservoir. L'eau s'évapore dans l'air et le rafraîchit. En ajustant la direction et la vitesse du flux d'air, l'utilisateur peut ajuster le rafraîchissement à ses besoins individuels.

- fonctionne avec les fenêtres légèrement ouvertes
- rafraîchit la place de travail, mais pas forcément tout le bureau (cône d'air frais)
- humidifie l'air
- faible consommation électrique (de l'ordre de 40 W par bureau, soit environ 10 moins que la climatisation classique)
- peu répandu sur le marché suisse

Points importants:

- N'oubliez pas de remplir l'appareil d'eau pour avoir du refroidissement.
- Placer le dos de l'appareil devant une porte ou une fenêtre ouverte pour lui permettre d'aspirer de l'air frais.
- Ouvrir une porte ou une fenêtre de l'autre côté pour assurer la ventilation à travers la pièce.

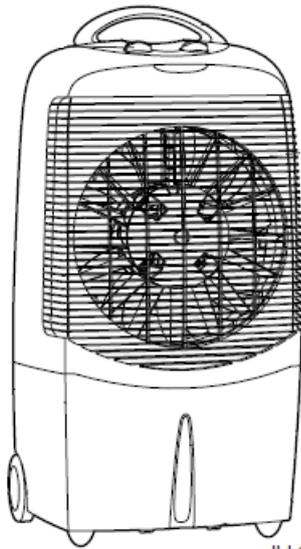
L'appareil ne produira pas un refroidissement satisfaisant dans une pièce fermée.

- Pendant des journées ensoleillées, laissez si possible les stores baissés.
- Laissez les fenêtres ouvertes pendant la nuit.

Mode d'emploi au verso.

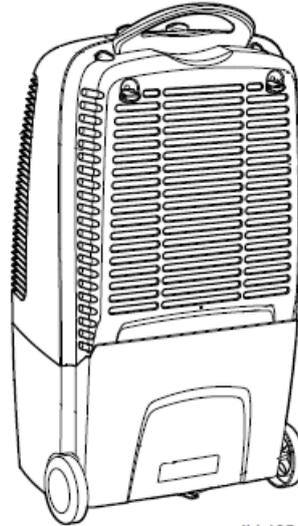
Contact: Carolina Fraga
fragaca2@etu.unige.ch

Front View



ILL1299-A

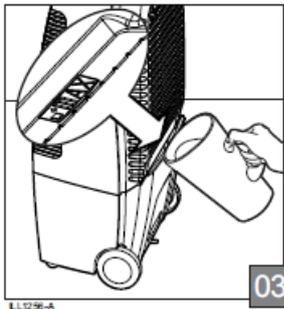
Back View



ILL1254-A

Operation

1. Place the cooler in front of an open window or door so that it is drawing in fresh air.
2. Pour clean water into the opening at the back of the cooler (Fig 03).

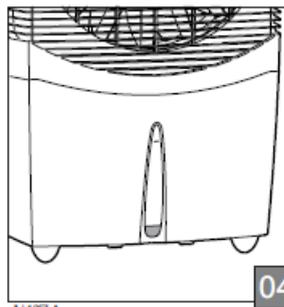


ILL1298-A

The water capacity of the cooler is 13 litres. The minimum amount of water required to operate the pump is 1.9 litres. No damage occurs to the cooler when it is operated without water.

3. Fill the cooler with water until the water reaches the maximum fill level indicated at the rear of the cooler (Fig 03). **Do not overfill** the cooler as water will spill on the floor.

4. Refill the cooler with clean water whenever the water level in the window appears low (Fig 04).

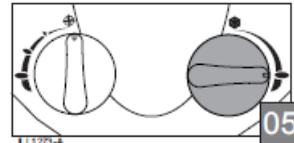


ILL1297-A

5. Ensure that there is adequate ventilation in the room by leaving a door or window open opposite the cooler.

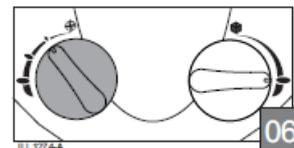
6. Plug the cord into the power outlet and turn the power on.

7. Turn the cool knob (❄) to the "cool" position (Fig 05).



ILL1295-A

8. Turn the fan (⚙) on to the desired speed (Fig 06). *Note!* Maximum cooling capacity will not be reached until the cooling pad is completely saturated. This may take several minutes.



ILL1274-A

9. If the desired comfort level is not achieved after this time, increase the fan speed. Lower fan speeds provide quieter operation.

10. If the room becomes too cool or too humid, turn the cool knob (❄) off and/or turn the fan knob (⚙) to a lower setting.

11. To turn your cooler off, simply turn the fan knob (⚙) off.

Test d'une alternative à la climatisation des bureaux

Rafrâchisseur évaporatif: **Mastercool**

Comment fonctionne le rafraîchissement évaporatif ?

Le rafraîchissement évaporatif s'inspire du processus naturel de la brise marine. Celle-ci doit sa fraîcheur à un mouvement d'air chaud en contact avec une surface d'eau, dont une partie s'évapore. L'évaporation absorbe de l'énergie et rafraîchit donc le flux d'air.

Un appareil de rafraîchissement évaporatif consiste en un ventilateur qui force l'air de la pièce au travers d'un évaporateur à grande surface d'échange, qui est maintenu humide grâce une petite pompe reliée à un réservoir. L'eau s'évapore dans l'air et le rafraîchit. En ajustant la direction et la vitesse du flux d'air, l'utilisateur peut ajuster le rafraîchissement à ses besoins individuels.

- fonctionne avec les fenêtres légèrement ouvertes
- rafraîchit la place de travail, mais pas forcément tout le bureau (cône d'air frais)
- humidifie l'air
- faible consommation électrique (de l'ordre de 40 W par bureau, soit environ 10 moins que la climatisation classique)
- peu répandu sur le marché suisse

Points importants:

- N'oubliez pas de remplir l'appareil d'eau pour avoir du refroidissement.
- Placer le dos de l'appareil devant une porte ou une fenêtre ouverte pour lui permettre d'aspirer de l'air frais.
- Ouvrir une porte ou une fenêtre de l'autre côté pour assurer la ventilation à travers la pièce.

L'appareil ne produira pas un refroidissement satisfaisant dans une pièce fermée.

- Pendant des journées ensoleillées, laissez si possible les stores baissés.
- Laissez les fenêtres ouvertes pendant la nuit.

Mode d'emploi au verso.

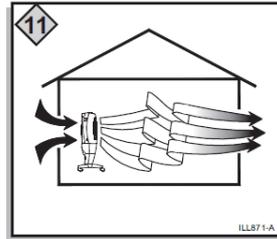
Contact: Carolina Fraga

fragaca2@etu.unige.ch

HOW TO GET THE BEST COOLING PERFORMANCE

Place the cooler with its back near to an open window or door so it can draw in 100% fresh air.

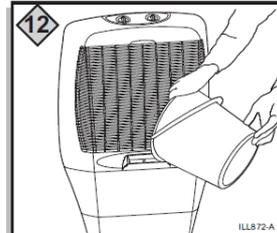
Open another window or door on the opposite side of the room for "flow through" ventilation. This cooler will not cool properly in a closed room (Fig 11).



FILLING WITH WATER

Turn the cooler off before filling. Open the water filling door and pour in clean water (Fig 12).

The water capacity is 14 litres. The minimum amount of water needed for the pump to operate is 2 litres.



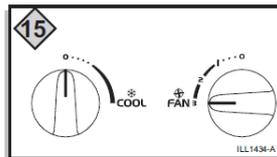
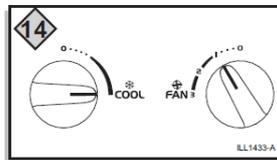
USING THE COOLER

When this appliance is used as an air cooler, it should be filled with water and the cool knob turned to the "COOL" position (Fig 14).

Low fan speed (1) is selected for quietest operation (Fig 14).

High fan speed (3) is for maximum cooling (Fig 15).

Fan only (ventilation). This cooler may be used as a fan only. Set the cool knob to position "0" (Fig 15).



AIR DIRECTION CONTROL MILLENIA / MASTERCOOL

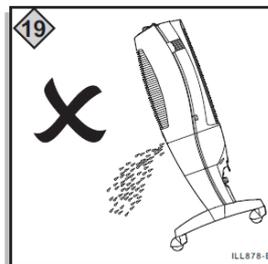
The cooler is provided with air guide vanes which can be adjusted as required to direct the air flow.

Models Millenia and Mastercool are adjusted manually by sliding the levers on the front panel (Fig 17).



SAFETY INSTRUCTIONS

As this cooler contains water, ensure it is moved carefully and is not tilted, as water may spill (Fig 19).



Annexe 3 : Informations données aux usagers quant à l'utilisation des climatiseurs classiques



Test d'une alternative à la climatisation des bureaux

Climatiseur: CL 550

Comment fonctionne un climatiseur classique ?

Dans un climatiseur classique, un compresseur similaire à celui d'un frigo extrait la chaleur de l'air et la rejette à l'extérieur du bâtiment.

- fonctionne avec les fenêtres fermées
- rafraîchit et sèche l'air du bureau
- forte consommation énergétique (de l'ordre de 400 W par bureau)
- facile à trouver sur le marché

Points importants:

- Positionnez le climatiseur de façon que l'air puisse librement circuler et qu'il n'y ait pas d'objets ou meubles directement devant les ouvertures de ventilation.
- Fermez si possible toutes les fenêtres et portes de la pièce.
- Pendant des journées ensoleillées, laissez si possible les stores baissés.
- Laissez les fenêtres ouvertes pendant la nuit.

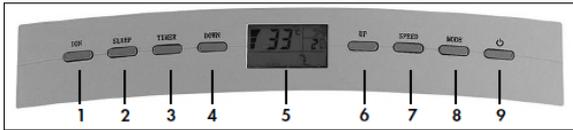
Mode d'emploi au verso.

Contact: Carolina Fraga

fragaca2@etu.unige.ch

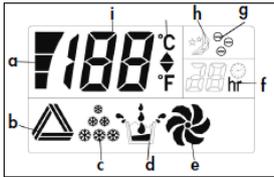
Mode d'emploi

Panneau de commande



- 1 Touche ION
- 2 Mode de repos (SLEEP)
- 3 Minuterie pour programmer la coupure automatique et la mise en service (TIMER)
- 4 Régulateur de température - plus froid (DOWN)
- 5 Écran
- 6 Régulateur de température - plus chaud (UP)
- 7 Vitesse du ventilateur (SPEED)
- 8 Choix de programmes (MODE)
- 9 Interrupteur (ON/OFF)

Display



- a **Témoin de ventilation**
3 vitesses de ventilation sont au choix: faible, moyenne et forte
- b **Témoin du mode automatique**
Deux modes automatiques sont au choix: Refroidissement automatique et ventilation automatique.
- c **Témoin du mode de refroidissement**
3 intensités de refroidissement sont au choix: faible, moyenne et forte
- d **Témoin de déshumidification ou témoin « réservoir plein »:**
Le clignotement des trois gouttes d'eau indiquent le mode de déshumidification.
Lorsque le réservoir d'eau est plein, le réservoir et les deux gouttes d'eau de ses côtés clignotent.
- e **Témoin de ventilateur**
Ce symbole tourne, lorsque le ventilateur est en fonction.
- f **Affichage des heures** (de 1 à 24)
- g **Témoin de ions**
- h **Témoin de mode repos**
- i **Témoin de température et réglage de température** (de 18 à 32°C)

Allumer l'appareil à l'aide de la touche

1. Dès que vous manipulez l'interrupteur, l'appareil commencera à travailler dans le mode AUTOMATIQUE. En appuyant sur la touche MODE (choix de programmes), vous pouvez choisir d'autres modes de service.
2. Les témoins du panneau de commande vous montreront quel mode est activé.
3. Afin d'éteindre l'appareil, appuyez sur la touche une deuxième fois.

Touche choix de programmes MODE

Avec la touche MODE vous pouvez choisir entre les programmes suivants: Mode automatique, mode de refroidissement ou ventilation. Les témoins du panneau de commande vous montreront le mode activé.

1. Fonction automatique

Le mode automatique signifie: Dès que la température ambiante est égale ou supérieur 24°C, le mode de refroidissement s'activera. La température préprogrammée pour le mode de refroidissement est 24°C.

Si la température ambiante est entre 20°C et 23°C, le ventilateur s'allumera et adaptera sa vitesse à la température ambiante.

2. Mode de refroidissement

En mode de refroidissement, le témoin s'allumera sur le panneau de commande. En ce mode, vous choisissez la température souhaitée

avec les touches UP et DOWN. A l'aide de la touche SPEED, vous pouvez également choisir la vitesse du ventilateur.

Attention: Le refroidissement s'éteindra dès que la température ambiante est inférieure à la température programmée. La ventilation, par contre, continue dans la vitesse choisie. Lorsque la température ambiante remonte, le refroidissement est à nouveau activé automatiquement.

3. Mode de ventilation

Si vous avez choisi ce fonction, vous pouvez choisir avec la touche SPEED entre trois vitesses: haute , medium et basse .

4. Mode de déshumidification

En mode de déshumidification, le symbole s'allumera. L'appareil éliminera de l'humidité de l'air ambiant. Le ventilateur travaille en basse vitesse, la température ne peut pas être réglée.

Touches de température UP et DOWN

- Appuyez sur la touche UP afin de faire augmenter la température et la touche DOWN afin de la faire baisser. L'écran affichera vos modifications. Il est possible de programmer une température entre 18°C et 32°C degrés.

- Si vous ne choisissez aucun programme, vous pouvez voir la température ambiante actuelle. L'appareil est capable de mesurer des températures entre 0°C et 50°C.

Touche minuterie « Timer » pour activer la coupure automatique ou la temporisation de démarrage

Avec la touche minuterie « Timer », vous pouvez choisir la durée de service – lorsque l'appareil est allumé – et l'heure à laquelle l'appareil doit s'allumer – lorsqu'il est éteint.

• Coupure automatique:

Pendant que l'appareil est allumé, vous pouvez programmer une certaine durée de service après laquelle il s'éteindra automatiquement. Choisissez la durée souhaitée à l'aide de la touche « Timer ».

• Temporisation de démarrage

Lorsque l'appareil est branché au courant, mais pas encore allumé par la touche , il est possible de programmer qu'il s'allume automatiquement après un certain nombre d'heures – grâce à la touche « Timer ».

a) En mode stand-by, appuyez sur la touche « Timer » et programmez le nombre d'heures après laquelle vous souhaitez que votre appareil s'active automatiquement.

b) Au bout de la durée programmée, l'appareil se mettra en fonction automatiquement.

c) Si l'appareil n'a pas été débranché depuis la dernière mise en service, il travaillera dans le mode dernièrement choisi. Si l'appareil a été débranché, il travaillera dans le mode automatique.

d) Si vous appuyez l'interrupteur avant le moment programmé, la minuterie est arrêtée et l'appareil s'allumera tout de suite. Il est possible

de programmer une durée entre une et 24 heures. Chaque manipulation du « Timer » augmentera la durée d'une heure. Si vous appuyez une fois de plus sur la touche, lorsque l'affichage montre « 24 », l'affichage changera à « 0 » et la coupure automatique et temporisation de démarrage seront désactivées.

Touche mode de repos SPEED

- En mode de refroidissement, l'appareil chauffera la température d'un degré pendant la première heure et de 2°C pendant la deuxième heure lorsque vous appuyez sur la touche de repos SLEEP. Cette température sera maintenue après.

- En mode de repos, le ventilateur restera en basse vitesse.

- L'appareil travaillera pendant 12 heures dans ce mode avant de s'éteindre automatiquement.

- Appuyer une deuxième fois sur la touche SLEEP éteindra ce programme de repos. Votre appareil reviendra dans le programme choisi auparavant.

Important: La fonction du repos ne peut être activé que dans le mode de refroidissement.

Touche ions

- Grâce à la fonction ions, il y a moins de particules de poussière dans l'air.

Écran

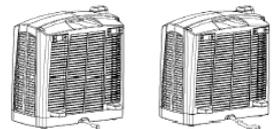
Le standard de l'affichage est la température ambiante actuelle (entre 0°C et 50°C). Pendant que vous choisissez la température avec les touches UP et DOWN, l'écran l'affichera pendant quelques secondes.

Important: Le compresseur a besoin de 3 minutes pour se mettre en route. Cela signifie: Après avoir éteint votre appareil, vous devez attendre 3 minutes avant de le rallumer à nouveau. Afin de changer d'une fonction à une autre, (par exemple du mode de refroidissement au mode de déshumidification) le compresseur aura également besoin de 3 minutes pour s'adapter.

Éliminez l'eau en condensation

- L'appareil est muni d'une fonction de drainage automatique. Au cas où le réservoir d'eau de condensation est pourtant plein, l'appareil s'éteindra automatiquement et le symbole s'affichera sur l'écran. Dans ce cas, l'eau en condensation doit être éliminée de l'unité extérieure.

- L'ouverture de vidange se trouve au dos de l'unité extérieure. Éteignez l'appareil et débranchez-le du courant. Enlevez le bouchon, connectez un tuyau d'écoulement (Ø 13 mm) et laissez couler l'eau dans un bol.



- En cas que le continue à clignoter, apportez votre appareil à la prochain station FUST.

- Avant de transporter ou entreposer l'appareil, vérifiez que l'eau en condensation a entièrement coulé des unités extérieure et intérieure. Si nécessaire, séchez l'appareil selon la description sous « rangement ».

Test d'une alternative à la climatisation des bureaux

Climatiseur: CL 1250

Comment fonctionne un climatiseur classique ?

Dans un climatiseur classique, un compresseur similaire à celui d'un frigo extrait la chaleur de l'air et la rejette à l'extérieur du bâtiment.

- fonctionne avec les fenêtres fermées
- rafraîchit et sèche l'air du bureau
- forte consommation énergétique (de l'ordre de 400 W par bureau)
- facile à trouver sur le marché

Points importants:

- Positionnez le climatiseur de façon que l'air puisse librement circuler et qu'il n'y ait pas d'objets ou meubles directement devant les ouvertures de ventilation.
- Fermez si possible toutes les fenêtres et portes de la pièce.
- Pendant des journées ensoleillées, laissez si possible les stores baissés.
- Laissez les fenêtres ouvertes pendant la nuit.

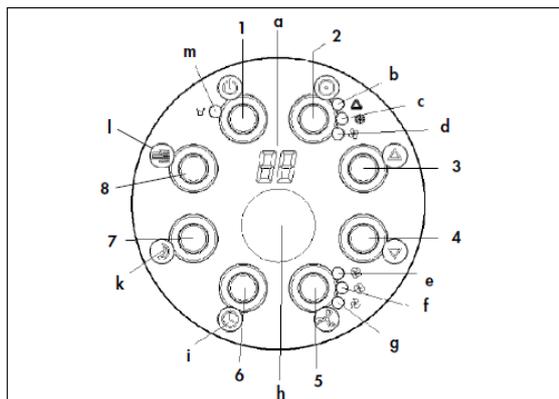
Mode d'emploi au verso.

Contact : Carolina Fraga

fragaca2@etu.unige.ch

Mode d'emploi

Panneau de commande



- | | |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Interrupteur ON/OFF | a Écran |
| 2 Choix de programmes (MODE) | b Témoin du mode automatique |
| 3 Régulateur de température - plus chaud | c Témoin du mode de refroidissement |
| 4 Régulateur de température - plus froid | d Témoin du ventilateur |
| 5 Vitesse du ventilateur | e Témoin de ventilation forte |
| 6 Minuterie pour programmer la coupure automatique et la mise en service | f Témoin de ventilation moyenne |
| 7 Mode de repos | g Témoin de ventilation faible |
| 8 Touche mode ions | h Récepteur de télécommande |
| | i Témoin de minuterie |
| | k Témoin de mode repos |
| | l Témoin de mode ions |
| | m Témoin « réservoir plein » |

Allumer l'appareil à l'aide de la touche

Dès que vous manipulez l'interrupteur, l'appareil commencera à travailler.

Afin d'éteindre l'appareil, appuyez sur la touche une deuxième fois.

Touche choix de programmes

Avec la touche [2] (choix de programmes), vous pouvez choisir entre les programmes suivants: Mode automatique, mode de refroidissement ou ventilation. Les témoins du panneau de commande vous montreront le mode activé.

1. Fonction automatique

Le mode automatique signifie: Dès que la température ambiante est égale ou supérieure 24°C, le mode de refroidissement s'activera. La température préprogrammée pour le mode de refroidissement est 24°C.

Si la température ambiante est entre 21°C et 23°C, le ventilateur s'allumera et adaptera sa vitesse à la température ambiante. Sur le panneau de commande s'affichera « b ».

2. Mode de refroidissement

En mode de refroidissement, le témoin « c » s'allumera sur le panneau de commande. En ce mode, vous choisissez la température souhaitée avec les touches « 3 » et « 4 ». À l'aide de la touche « 5 », vous pouvez également choisir la vitesse du ventilateur.

Attention: Le refroidissement s'éteindra dès que la température ambian-

te est inférieure à la température programmée. La ventilation, par contre, continue dans la vitesse choisie. Lorsque la température ambiante remonte, le refroidissement est à nouveau activé automatiquement.

3. Mode de ventilation

Le témoin « d » sur le panneau de commande vous montrera que vous avez activé la ventilation. Avec la touche « 5 », vous pouvez choisir entre trois vitesses: haute, moyenne et basse. Le témoin correspondant s'allumera, « e », « f » ou « g ».

En mode automatique, la vitesse du ventilateur sera adaptée à la température ambiante et ne peut pas être réglée manuellement.

Touches de température

- Appuyez sur la touche « 3 » afin de faire augmenter la température et la touche « 4 » afin de la faire baisser. L'écran affichera vos modifications. Il est possible de programmer une température entre 18°C et 32°C degrés.

- Si vous ne choisissez aucun programme, vous pouvez voir la température ambiante actuelle. L'appareil est capable de mesurer des températures entre 0°C et 50°C.

Touche minuterie « Timer » pour activer la coupure automatique ou la temporisation de démarrage

Avec la touche minuterie [6], vous pouvez choisir la durée de service – lorsque l'appareil est allumé – et l'heure à laquelle l'appareil doit s'allumer – lorsqu'il est éteint.

Un témoin s'allumera sur le panneau de commande dès que vous appuyez sur la touche « Timer ». Le symbole « horloge » [i] est allumé pendant que la fonction est activée.

Coupure automatique:

Pendant que l'appareil est allumé, vous pouvez programmer une certaine durée de service après laquelle il s'éteindra automatiquement. Choisissez la durée souhaitée à l'aide de la touche « Timer ».

Temporisation de démarrage

Lorsque l'appareil est branché au courant, mais pas encore allumé par la touche , il est possible de programmer qu'il s'allume automatiquement après un certain nombre d'heures – grâce à la touche « Timer ».

a) En mode stand-by, appuyez sur la touche « Timer » et programmez le nombre d'heures après laquelle vous souhaitez que votre appareil s'active automatiquement.

b) Au bout de la durée programmée, l'appareil se mettra en fonction automatiquement.

c) Si l'appareil n'a pas été débranché depuis la dernière mise en service, il travaillera dans le mode dernièrement choisi. Si l'appareil a été débranché, il travaillera dans le mode automatique.

d) Si vous appuyez l'interrupteur avant le moment programmé, la minuterie est arrêtée et l'appareil s'allumera tout de suite. Il est possible de programmer une durée entre une et 24 heures. Chaque manipulation du « Timer » augmentera la durée d'une heure. Si vous appuyez une

fois de plus sur la touche, lorsque l'affichage montre « 24 », l'affichage changera à « 0 » et la coupure automatique et temporisation de démarrage seront désactivées.

Touche mode de repos

- En mode de refroidissement, l'appareil chauffera la température d'un degré pendant la première heure et de 2°C pendant la deuxième heure lorsque vous appuyez sur la touche de repos [7]. Cette température sera maintenue après.

- En mode de repos, le ventilateur restera en basse vitesse.

- L'appareil travaillera pendant 12 heures dans ce mode avant de s'éteindre automatiquement.

- Appuyer une deuxième fois sur la touche éteindra ce programme de repos. Votre appareil reviendra dans le programme choisi auparavant.

Important: La fonction du repos ne peut être activé que dans le mode de refroidissement.

Touche mode ions

- Lorsque vous appuyez sur la touche ions [8], l'air sera nettoyé, il y aura moins de particules de poussière dans l'air.

Écran

Le standard de l'affichage est la température ambiante actuelle (entre 0°C et 50°C). Pendant que vous choisissez la température avec les touches [3] et [4], l'écran l'affichera pendant quelques secondes.

Important: Le compresseur a besoin de 3 minutes pour se mettre en route. Cela signifie: Après avoir éteint votre appareil, vous devez attendre 3 minutes avant de le rallumer à nouveau. Afin de changer d'une fonction à une autre, (par exemple du mode de refroidissement au mode de ventilation) le compresseur aura également besoin de 3 minutes pour s'adapter.

Éliminez l'eau en condensation

- Lorsque le réservoir interne de l'eau en condensation est plein, l'appareil s'éteint automatiquement, sur l'écran clignotera « m » et l'appareil donne un signal d'alarme.

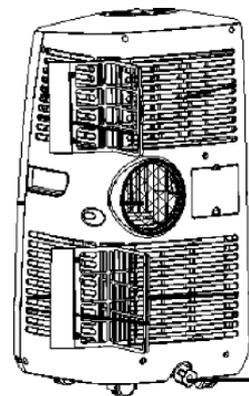
- Le signal peut être arrêté en appuyant sur une touche quelconque.

- Afin de vider le réservoir, débranchez l'appareil du courant. Ne bougez pas l'appareil, afin d'éviter que l'eau dépasse le réservoir.

- Positionnez un bol sous l'ouverture d'écoulement au dos de l'appareil.

- Laissez couler l'eau dans ce bol. Si le bol est rempli avant que le réservoir soit complètement vidé, refermez le réservoir, videz le bol, et continuez la procédure jusqu'à ce que le réservoir soit entièrement vide.

- Ensuite, repositionnez le bouchon et resserrez la fermeture.



Écoulement de l'eau de condensation

Annexe 4 : Dénomination détaillée des différentes mesures enregistrées

Mesures météorologiques		Remarque
Text	Température de l'air extérieur	
Hext	Humidité relative de l'air extérieur	
Mesures au niveau des places de travail		Remarque
Td_i	Température de l'air	
Hd_i	Humidité relative de l'air	
Ud_i	Présence de l'utilisateur	
Mesures au niveau des fenêtres		Remarque
Twj_i	Température des vitrages	
Uwj_i	Etat des fenêtres (ouvertes ou fermées)	
Mesures au niveau des dispositifs de refroidissement		Remarque
I_i	Courant	
Tcout_i	Température de l'air à la sortie de l'appareil	
Hcout_i	Humidité relative de l'air à la sortie de l'appareil	
Tcin_i	Température de l'air à l'entrée de l'appareil	Uniquement pour les rafraîchisseurs adiabatiques

Remarque : j est un nombre compris entre 1 et 4 et représente les fenêtres et i est le numéro du bureau

Annexe 5 : Premier questionnaire complété à la fin de la phase 1



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

INSTITUT DES SCIENCES
DE L'ENVIRONNEMENT

Test d'une alternative à la climatisation des bureaux

Par rapport à ces 2 semaines, sans système de rafraîchissement:

1. En général, êtes-vous satisfait de la température sur votre lieu de travail?

Oui Non

2. Comment décrivez-vous les conditions de travail dans votre bureau?

2.1 Température

	1	2	3	4	5	6	7	
Trop Chaud	<input type="checkbox"/>	Trop froid						
Stable	<input type="checkbox"/>	Varie dans la journée						
Confortable	<input type="checkbox"/>	Inconfortable						

2.2 Qualité de l'air

	1	2	3	4	5	6	7	
Sec	<input type="checkbox"/>	Humide						
Frais	<input type="checkbox"/>	Etouffant						
Sans odeur	<input type="checkbox"/>	Puant						
Satisfaisant	<input type="checkbox"/>	Insatisfaisant						
Stable	<input type="checkbox"/>	Courants d'air						
Sain	<input type="checkbox"/>	Malsain						

3. Etes-vous incommodé par le bruit lorsque vous ouvrez une fenêtre?

Oui Non

Contact: Carolina Fraga

fragaca2@etu.unige.ch

Annexe 6 : Questionnaire rempli à la fin de l'expérience



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

INSTITUT DES SCIENCES
DE L'ENVIRONNEMENT

Enquête

Contact: Carolina Fraga
fragaca2@etu.unige.ch

Test d'une alternative à la climatisation des bureaux

Bâtiment:

Bureau:

Nom:

Informations Générales

Depuis quand travaillez-vous dans ce bâtiment? mois années

Depuis quand travaillez-vous dans ce bureau? mois années

Combien d'heures par semaine passez-vous dans ce bâtiment?

Vous y compris, combien de personnes travaillent dans votre bureau?

Quel est votre âge?

Quel est votre sexe?

 homme femme

Conditions AVANT L'étude

En général, êtes-vous satisfait de la température ambiante sur votre lieu de travail en été?

Oui Non

Est-ce que vous utilisez les mécanismes suivants pour agir sur la température de votre bureau?

	Oui	Non
Ouverture fenêtre de nuit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Protections solaires.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ventilation de table ou de plafond.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Avez-vous une indication de la température extérieure? Oui Non

intérieure? Oui Non

Pensez -vous être plus sensible lorsqu'il fait chaud dehors? Oui Non

Pensez -vous être plus sensible lorsqu'il fait froid dehors? Oui Non

A partir de quelle température intérieure jugez-vous nécessaire de rafraîchir les locaux en été?

°C

Modifiez-vous vos horaires de travail en fonction de la température des locaux?

Oui Non

Avez-vous déjà soumis une demande d'amélioration de la ventilation ou de l'air conditionné dans vos locaux? Oui Non

Précisez quelle est pour vous l'importance d'avoir une température convenable sur votre lieu de travail.

Vous travaillez mieux	Vrai. <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Faux.
Votre état de santé est meilleur	Vrai. <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Faux.
Votre humeur est meilleur	Vrai. <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Faux.
Votre satisfaction est meilleure	Vrai. <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Faux.
Vous êtes moins fatigué	Vrai. <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Faux.

Autre (préciser):

Par rapport à la période durant l'utilisation d'un climatiseur classique.

Lors de l'utilisation du climatiseur classique, comment décrivez-vous les conditions de travail dans votre bureau?

Température

	1	2	3	4	5	6	7	
Trop Chaud	<input type="checkbox"/>	Trop froid						
Stable	<input type="checkbox"/>	Varie dans la journée						
Confortable	<input type="checkbox"/>	Inconfortable						

Qualité de l'air

	1	2	3	4	5	6	7	
Sec	<input type="checkbox"/>	Humide						
Frais	<input type="checkbox"/>	Etouffant						
Sans odeur	<input type="checkbox"/>	Mauvaise odeur						
Satisfaisant	<input type="checkbox"/>	Insatisfaisant						
Stable	<input type="checkbox"/>	Courants d'air						
Sain	<input type="checkbox"/>	Malsain						

Bruit

	1	2	3	4	5	6	7	
Imperceptible	<input type="checkbox"/>	insupportable						

Avec quelle rapidité les réglages du climatiseur ont-ils eu un effet?

	1	2	3	4	5	6	7	
Aucun effet	<input type="checkbox"/>	Très rapidement						

Avez-vous l'impression de comprendre suffisamment bien le fonctionnement du système de climatisation ?

Oui Non

Avez-vous remarqué des différences personnelles avec vos collègues au niveau de la régulation de la température au sein de votre bureau?

Oui Non

Si oui, cela vous pose-t-il des problèmes?

Oui Non

Avez-vous souffert d'un ou de plusieurs des problèmes suivants au travail à cause du climatiseur?

Fatigue Yeux secs Problèmes cutanés Gorge sèche Maux de tête
 Vertiges Autres (préciser):

Si oui, plus souvent que sans le système de refroidissement?

Oui Non

Par rapport à la période durant l'utilisation d'un rafraîchisseur évaporatif.

Lors de l'utilisation du rafraîchisseur évaporatif, comment décrivez-vous les conditions de travail dans votre bureau?

Température

	1	2	3	4	5	6	7	
Trop Chaud	<input type="checkbox"/>	Trop froid						
Stable	<input type="checkbox"/>	Varie dans la journée						
Confortable	<input type="checkbox"/>	Inconfortable						

Qualité de l'air

	1	2	3	4	5	6	7	
Sec	<input type="checkbox"/>	Humide						
Frais	<input type="checkbox"/>	Etouffant						
Sans odeur	<input type="checkbox"/>	Mauvaise odeur						
Satisfaisant	<input type="checkbox"/>	Insatisfaisant						
Stable	<input type="checkbox"/>	Courants d'air						
Sain	<input type="checkbox"/>	Malsain						

Bruit

	1	2	3	4	5	6	7	
Imperceptible	<input type="checkbox"/>	insupportable						

Avec quelle rapidité les réglages du rafraîchisseur ont-ils eu un effet?

	1	2	3	4	5	6	7	
Aucun effet	<input type="checkbox"/>	Très rapidement						

Avez-vous l'impression de comprendre suffisamment bien le fonctionnement du système de refroidissement?

Oui Non

Avez-vous remarqué des différences personnelles avec vos collègues au niveau de la régulation de la température au sein de votre bureau?

Oui Non

Si oui, cela vous pose-t-il des problèmes?

Oui Non

Avez-vous souffert d'un ou de plusieurs des problèmes suivants au travail à cause du rafraîchisseur?

Fatigue Yeux secs Problèmes cutanés Gorge sèche Maux de tête
 Vertiges Autres (préciser):

Si oui, plus souvent que sans le système de refroidissement?

Oui Non

Annexe 7 : Fiche de coches des ressentis (1 fiche par semaine)

Building:														
Office:														
Name:														
Day	Hour	How are you feeling?						How would you like it to be?						Remarks/Opinions
	Arrival	Morning	Lunch	Afternoon	Departure	Day Average	Arrival	Morning	Lunch	Afternoon	Departure	Day Average		
Day	Hour	How are you feeling?						How would you like it to be?						
	Arrival	Morning	Lunch	Afternoon	Departure	Day Average	Arrival	Morning	Lunch	Afternoon	Departure	Day Average		
Day	Hour	How are you feeling?						How would you like it to be?						
	Arrival	Morning	Lunch	Afternoon	Departure	Day Average	Arrival	Morning	Lunch	Afternoon	Departure	Day Average		
Day	Hour	How are you feeling?						How would you like it to be?						
	Arrival	Morning	Lunch	Afternoon	Departure	Day Average	Arrival	Morning	Lunch	Afternoon	Departure	Day Average		

Annexe 8 : Valeurs des surfaces et des vitesses moyennes pour les différents appareils de refroidissement

	Vitesse de ventilation	CL 550 SPLIT	CL 1250 MONO	MAGICOOL	MASTERCOOL
Surface (m ²)		0.015	0.030	0.059	0.098
Vitesse moyenne (m/s)	v1	5.00	2.32	2.63	1.70
	v2	5.06	3.09	2.77	2.27
	v3	5.77	4.30	3.93	2.67

Annexe 9 : Vitesses de l'air (m/s) au niveau de la grille de ventilation pour les trois vitesses de ventilation (v1, v2, v3) pour le CL 550 et photographie de la grille de ventilation du CL 550

v1

6.87	3.42	6.07	4.32	5.77	4.48	3.69	2.45	1.74	2.46	9.63	8.96	14.56	14.3	12.58	11.31	2.09	5.61
7.53	4.74	9.18	3.42	5.96	2.51	1.98	1.68	2.08	1.58	11.31	11.62	11.54	11.62	8.15	6.54	4.28	6.38
6.36	4.04	7.86	1.61	6.05	1.47	2.03	1.47	3.47	2.84	13.52	11.85	12.78	12.39	8.74	4.07	3.39	5.08
6.74	6.67	7.99	3.36	3.5	1.83	3.53	1.55	3.59	1.88	12.29	4.63	2.41	1.44	2.04	2.75		
1.3	1.81	4.48	2.95	3.31	1.74	1.77	1.12	3.53	2.57	3.08	3.42						
		1.74	1.47	1.21	0.94	0.9	0.74	0.75	3.42								

v2

4.83	4.91	5.87	4.74	3.73	3.74	3.85	2.85	2.04	6.3	8.27	8.61	10.77	11.54	10.8	10.59	5.33	4.83
7.87	3.41	8.76	3.39	7.42	3.84	3.54	1.81	2.99	3.37	11.48	12.22	12.92	14.61	11.03	9.24	2.93	2.87
6.68	4.14	6.83	2.22	6.36	3.83	4.69	1.58	2.46	4.39	12.92	12.79	12.1	12.7	8.26	3.65	7.76	5.29
5.79	6.3	6.12	4.49	4.9	1.32	3.91	1.85	4.05	3.56	2.8	5.64	2.09	2.04	2.08	2.35		
1.55	1.87	2.42	2.96	3.81	1.99	2.56	1.52	2.11	3.43	1.87	2.77						
		1.17	1.22	1.21	1.12	1.27	0.99	1.09	2.8								

v3

8.86	4.71	10.17	8.49	8.82	4.25	5.29	2	1.68	2.83	12.71	8.8	16.01	16.83	15.12	14.05	3.86	5.47
6.64	2.59	8.7	3.19	7.17	2.55	4.63	1.94	2.36	2.2	14.67	14.14	16.61	16.15	12.13	6.9	3.91	4.08
6.17	4.83	8.36	2.3	6.1	1.95	4.31	1.59	3.44	1.92	15.95	15.23	13.92	15.14	8.17	4.26	8.09	5.25
5.54	6.43	8.53	3.24	4.1	3.54	5.14	1.47	5.06	1.82	10.28	4.75	2.87	2.23	2.03	2.43		
1.54	2.33	3.58	3.78	3.67	2.85	2.51	1.4	2	2.93	2.88	2.89						
		1.13	1.33	1.12	1.14	1.2	0.98	1.15	2.07								



Remarque : les couleurs vertes représentent des vitesses faibles et les couleurs rouges des vitesses élevées.

Annexe 10 : Vitesses de l'air (m/s) au niveau de la grille de ventilation pour les trois vitesses de ventilation (v1, v2, v3) pour le CL 1250 et photographie de la grille de ventilation du CL 1250

v3

3.52	1.42	0.96	0.61	0.31
9.18	5.16	2.06	1.63	0.68
10.24	9.86	4.26	1.11	1.19
10.55	11.82	9.57	1.32	1.36
9.65	9.53	2.6	1.47	1
8.01	6.03	1.54	0.81	1.59

v1

2.44	0.74	1.34	0.48	0.45
4.9	2.87	1.11	0.99	0.63
5.26	5.52	0.87	1.18	1.01
5.45	6.17	1.43	1.4	0.9
5.18	4.59	1.62	3.32	0.66
4.27	2.08	1.81	0.45	0.48

v2

2.03	1.31	0.93	0.46	0.29
5.47	3.09	1.11	0.73	0.4
6.97	6.27	2.62	0.83	0.54
6.2	7.97	3.22	3.34	2.1
6.37	6.14	5.04	4.03	1.08
5.62	3.78	3.19	0.52	1.05



Remarque : les couleurs vertes représentent des vitesses faibles et les couleurs rouges des vitesses élevées.

Annexe 11 : Vitesses de l'air (m/s) au niveau de la grille de ventilation pour les trois vitesses de ventilation (v1, v2, v3) pour le magicool et photographie de la grille de ventilation du magicool

v1

	2.54	2.15	2.71	3.88	
	2.48	2.16	2.67	2.83	
1.81	3.99	2.65	3.49	2.94	3.27
2.91	3.42	1.45	2.05	3.48	3.34
2.61	2.25	0.92	0.98	1.36	3.03
3.72	2.57	1.29	1.4	1.75	3.31
3.09	2.47	0.97	1.93	2.91	3.47
3.14	3.41	2.43	3.22	3.79	3.72
	3.38	3.09	2.94	2.83	
	1.98	2.34	2.54	2.51	
		2.39	2.24		

v3

	3.7	3.41	4.26	5.81	
	4.15	3.83	4.77	4.21	
3.94	5.05	2.91	4.26	5.26	3.83
5.28	4.58	1.57	2.72	4.68	5.98
3.49	4.11	1.22	2.16	2.62	4.44
4.8	4.48	1.48	2.2	2.85	5.56
4.16	3.87	1.37	2.44	4.04	4.27
4.55	4.45	3.53	3.87	4.84	4.41
	5.17	4.7	4.77	4.23	
	3.85	4.45	4.46	3.97	
		3.5	3.48		

v2

	3.56	2.27	3.17	4.51	
	2.86	2.56	3.12	3.37	
2.59	3.52	1.87	2.91	3.43	3.52
3.22	2.94	1.21	1.52	3.06	3.94
2.26	2.73	1.28	1.68	1.34	3.39
3.18	3.15	1.5	1.38	2.33	0.0379
2.67	2.83	2.01	3.35	1.96	3.56
2.62	3.32	3.48	3.24	3.18	3.44
	3.45	3.4	3.4	3.08	
	2.42	2.77	3.45	3.28	
		2.57	2.53		



Remarque : les couleurs vertes représentent des vitesses faibles et les couleurs rouges des vitesses élevées.

Annexe 12 : Vitesses de l'air (m/s) au niveau de la grille de ventilation pour les trois vitesses de ventilation (v1, v2, v3) pour le mastercool et photographie de la grille de ventilation du mastercool

v1

0.5	0.79	1.51	1.07	3.19	2	0.54	0.73
0.11	0.73	3.45	2.09	3.63	3.48	0.68	0.13
0.09	2.31	3.15	1.82	3.07	3.18	3.62	0.11
0.55	3.05	2.13	0.74	1.78	1.94	3.38	2
1.46	2.65	1.54	0.58	0.63	1.25	3.57	3.52
1.31	2.54	0.84	0.35	0.32	0.72	3.66	2.3
1.73	1.24	0.93	0.28	0.3	0.31	1.89	4
1.64	2.12	0.96	0.33	0.31	0.82	2.31	2.32
1.83	3.21	0.46	0.86	0.6	2.38	3.62	3.36
0.6	2.69	2.19	2.42	2.77	2.92	3.39	1.11
0.28	2.01	2.69	2.6	3.03	3.19	2.34	0.51
0.12	0.99	1.8	2.45	3.19	2.39	1.28	0.35
0.13	0.23	0.34	1.67	3.56	0.37	0.26	0.32

v3

0.81	0.73	1.12	0.77	4.22	0.83	0.59	0.8
0.36	1.34	6.04	2.27	5.76	5.7	0.64	0.14
0.42	5.39	5.84	2.17	4.99	4.7	5.61	0.25
0.53	5.41	3.46	0.76	2.33	2.92	5.45	2.2
4.09	4.79	1.99	0.56	0.76	2.15	4.9	5.89
1.79	4.73	0.76	0.48	0.42	0.92	3.02	2.88
4.2	2.61	0.56	0.29	0.54	1.73	3.64	5.39
4.23	3.94	0.78	0.45	0.63	1.89	5.18	2.69
3.72	5.03	0.6	0.52	1.2	4.26	5.21	4.53
2.65	4.9	3.16	3.91	4.09	4.27	4.21	2.15
0.45	4.24	4.51	4.2	4.74	5.09	4.69	0.48
0.48	1.34	4.5	3.27	4.7	4.82	2.16	0.31
0.4	0.45	0.69	2.75	3.56	0.97	0.41	0.25

v2

0.64	0.59	1.17	0.7	4.03	0.8	0.59	0.72
0.37	1.27	4.96	2.16	5.36	4.54	0.45	0.27
0.39	4.74	4.8	1.92	4.31	4.48	5.13	0.13
0.74	3.82	3.09	0.67	2	2.81	4.95	2.31
3.21	3.9	1.4	0.52	0.78	1.77	4.79	5.24
1.66	2.67	0.59	0.45	0.31	0.97	2.33	2.07
3.85	2.34	0.46	0.22	0.32	1.17	3.28	3.86
3.01	3.19	0.44	0.45	0.52	1.23	4.6	2.3
3.38	4.13	0.64	1.01	1.01	4.03	4.66	4.16
2.05	4.44	3.19	2.79	0.52	4.13	3.69	0.88
0.43	3.97	4.07	3.86	3.91	4.4	3.85	0.38
0.41	1.2	3.73	3.44	3.44	3.96	1.79	0.43
0.4	0.31	0.72	2.75	3.92	0.5	0.25	0.39



Remarque : les couleurs vertes représentent des vitesses faibles et les couleurs rouges des vitesses élevées.

Annexe 13 : Explication détaillée des calculs effectués pour la caractérisation thermique et énergétique des appareils de refroidissement portables

Puissance électrique

Connaissant le courant électrique consommé par les appareils, il est possible de calculer leur puissance électrique par l'équation suivante :

$$P = U \times I \times \cos\varphi$$

Où P = puissance électrique en W

U = tension du réseau en V

I = courant en A

$\cos\varphi$ = facteur de puissance

Les facteurs de puissance des rafraîchisseurs adiabatiques ont été mesurés avec un énergie-mètre de type EMU 1.28K. Les facteurs de puissance des climatiseurs ont été demandés au constructeur. Les valeurs sont présentées dans le tableau ci-dessous :

	CL 550 SPLIT	CL 1250 MONO	MAGICOOL	MASTERCOOL
v1	0.95	0.95	0.99	1.00
v2	0.95	0.95	0.98	1.00
v3	0.95	0.95	0.95	0.98

La tension utilisée pour le calcul est la tension sur le réseau au moment des mesures de courant. Comme expliqué au paragraphe 1.4.b, le courant est mesuré à différents moments pour les climatiseurs classiques et pour les rafraîchisseurs adiabatiques. On utilise une tension de 232 V pour les rafraîchisseurs adiabatiques et de 229 V pour les climatiseurs classiques.

Puissance frigorifique

En faisant l'hypothèse d'un débit volumique constant pour chaque vitesse de ventilation, on peut calculer la puissance frigorifique fournie Q (en W) pour les deux types de dispositifs de refroidissement par les équations suivantes :

$$Q = C_p \times \rho_a \times D \times \Delta T$$

$$\rho_a = \frac{P_{atm} \times M_{air}}{T_{out} \times R}$$

- Où
- C_p = chaleur spécifique de l'air = 1'004 J/K.kg
 - D = débit en m³/h
 - ΔT = différence de température entre l'entrée et la sortie en K
 - ρ_a = masse volumique de l'air en kg/m³
 - P_{atm} = pression atmosphérique = 96'620 Pa¹³
 - M_{air} = masse molaire de l'air = 0.02896 kg/mol
 - T_{out} = température de sortie en K
 - R = constante universelle des gaz parfaits = 18.0153 J/mol.K

Energy Efficiency Rating (EER)

Le rapport d'efficacité énergétique (EER) des dispositifs se calcule de la manière suivante :

$$EER = \frac{Q}{E}$$

- Où
- Q = quantité d'énergie frigorifique fournie en kW
 - E = énergie électrique consommée en kW

Consommation d'eau

La consommation d'eau est calculée uniquement pour les dispositifs de refroidissement évaporatif. Elle se calcule d'après les formules suivantes :

$$\Delta m_w = (\Delta \beta \times D) \times 10^3$$

$$\beta = \frac{P_{vap} \times M_{eau}}{R \times T}$$

¹³ Pression atmosphérique à la station météo Genève-Cointrin au moment des mesures (juillet 2011) à 420 m d'altitude.

$$P_{vap} = Hr \times P_{sat} \div 100$$

$$P_{sat} = 1.40974 \times 10^{10} \times \exp(-3928.5/(T + 231.667))$$

- Où Δm_w = consommation d'eau en g/h
D = débit en m³/h
 $\Delta\beta$ = différence d'humidité absolue entre la sortie et l'entrée en kg_{eau}/m³_{air}
M_{eau} = masse molaire de l'eau = 0.018015 kg/mol
T = température en K dans β et en °C dans P_{sat}
R = constante universelle des gaz parfaits = 18.0153 J/mol.K
P_{vap} = pression de vapeur d'eau en Pa
Hr = humidité relative en %
P_{sat} = pression de vapeur saturante en Pa (Roulet, 1987)

Différence de température potentielle

La différence de température potentielle ΔT_{pot} est la différence de température théorique que l'on pourrait obtenir dans des conditions données d'après le diagramme psychrométrique. Elle se calcule de la manière suivante :

$$\Delta T_{pot} = T_{in} - T_{hum}$$

- Où T_{in} = température d'entrée en °C
 T_{hum} = température humide en °C

La température humide est calculée par approximation itérative de l'intersection entre la droite iso-enthalpique et la pression de saturation (de Sousa Fraga, 2011).

Annexe 14 : Méthode utilisée afin de savoir si les appareils de refroidissement sont éteints ou allumés

Les mesures de consommation de courant des climatiseurs classiques, réalisées avec le capteur de courant ayant un fond d'échelle de 100 A, nous permettent de savoir si les climatiseurs sont éteints ou allumés. Suite à la caractérisation des appareils on peut dire que lorsque la consommation de courant est supérieure à 3 A alors les climatiseurs sont allumés, sinon ils sont éteints.

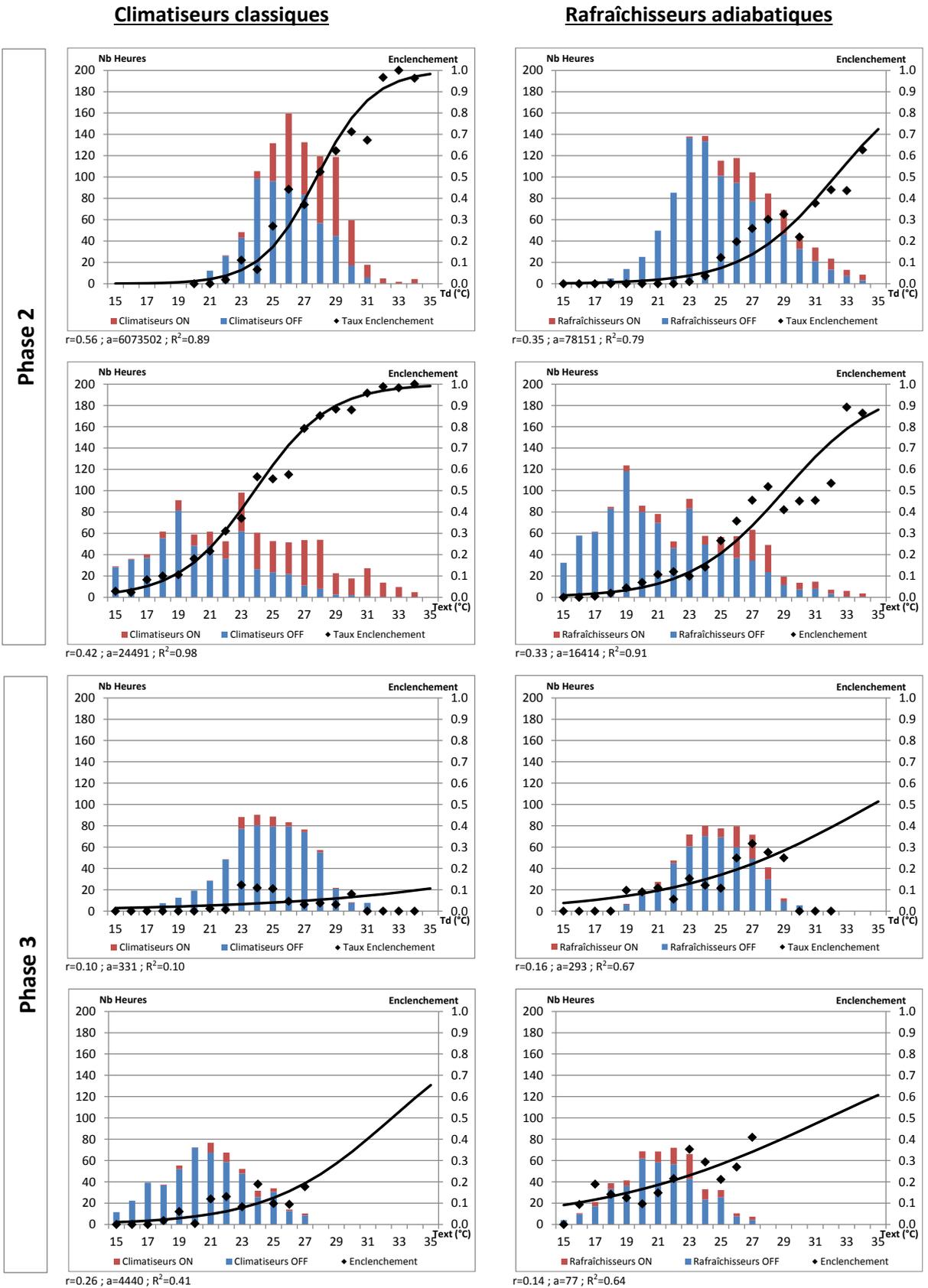
Les mesures de consommation de courant ne peuvent pas être utilisées pour les rafraîchisseurs adiabatiques car leur consommation est trop petite pour être correctement mesurée par un appareil ayant un fond d'échelle de 100 A. On utilise donc la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie des rafraîchisseurs. D'après les caractéristiques des appareils, si le ΔT_{in-out} est supérieur à 2°C on considère que l'appareil est allumé.

Cependant il est possible de constater dans les données que parfois ΔT_{in-out} est supérieur à 2°C alors que personne n'est présent et que l'appareil devrait en toute logique être éteint. Cela peut s'expliquer par le fait que dans la majorité des bureaux il y a au moins deux personnes. La personne occupant une place de travail sur laquelle aucune mesure n'est prise peut se servir de l'appareil. Si la personne est seule, elle ne se trouve pas forcément devant le capteur de présence, ou alors la sonde de température est au soleil et mesure donc une température plus élevée. Afin de limiter ce biais, nous allons travailler par la suite uniquement sur les données lorsque les gens sont présents.

Annexe 15 : Variables a et r et coefficients de corrélation R² de l'équation de la fonction logistique pour les phases 2 et 3

		Td	Text
Climatiseurs classiques	r	0.44	0.46
	a	421112	75266
	R ²	0.87	0.97
Rafraîchisseurs adiabatiques	r	0.27	0.27
	a	6835	2579
	R ²	0.90	0.92

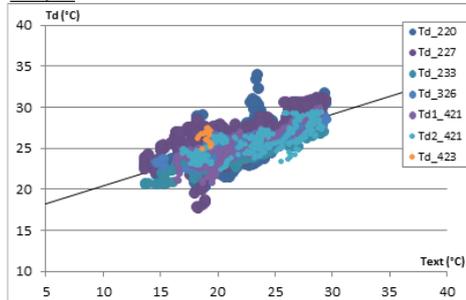
Annexe 16 : Nombre d'heures où les appareils sont éteints ou allumés pendant la présence de l'utilisateur, taux d'enclenchement des appareils et taux d'enclenchement modélisé en fonction de la température intérieure et de la température extérieure, pour la phase 2 et la phase 3.



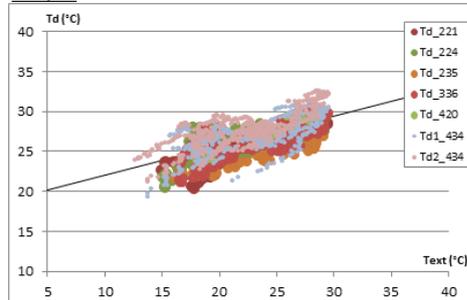
Annexe 17 : Signature énergétique (moyennes 10 minutes) pendant les phases 1, 2 et 3, lorsque les occupants sont présents

Phase 1

Groupe 1

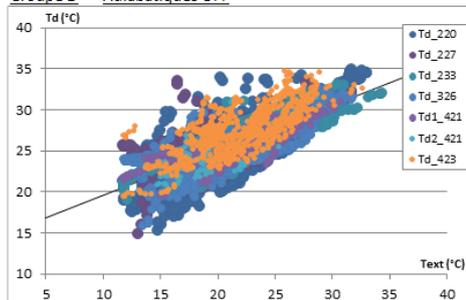


Groupe 2

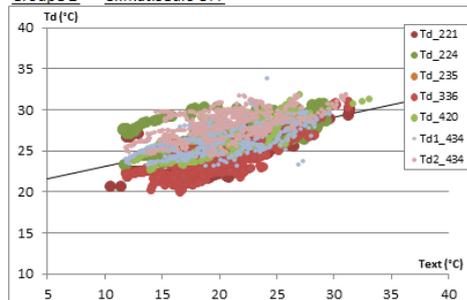


Phase 2

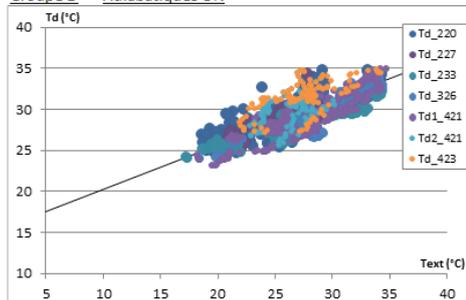
Groupe 1 Adiabatiques OFF



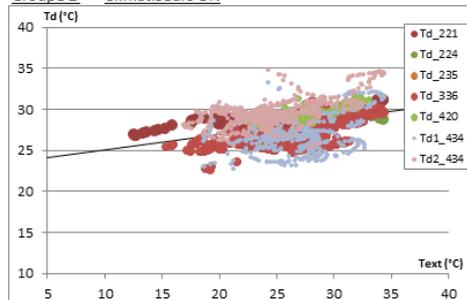
Groupe 2 Climatiseurs OFF



Groupe 1 Adiabatiques ON

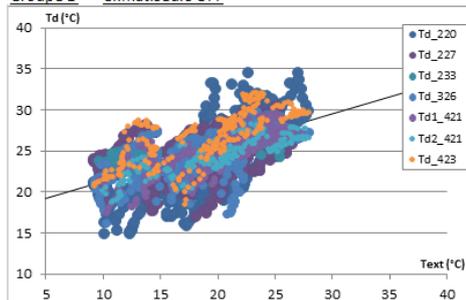


Groupe 2 Climatiseurs ON

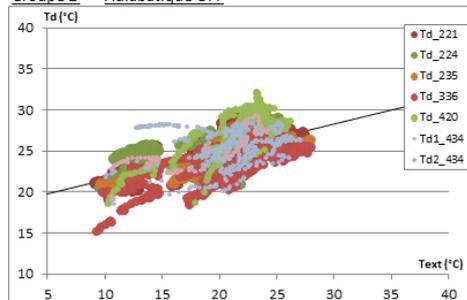


Phase 3

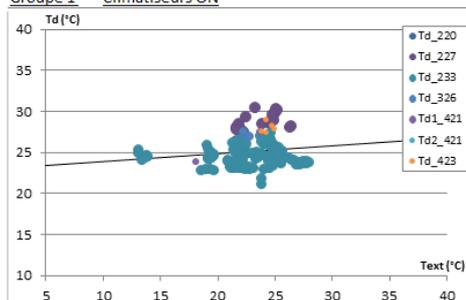
Groupe 1 Climatiseurs OFF



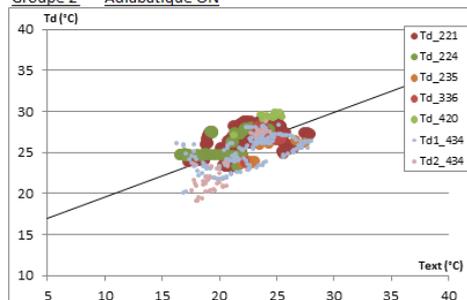
Groupe 2 Adiabatique OFF



Groupe 1 Climatiseurs ON



Groupe 2 Adiabatique ON

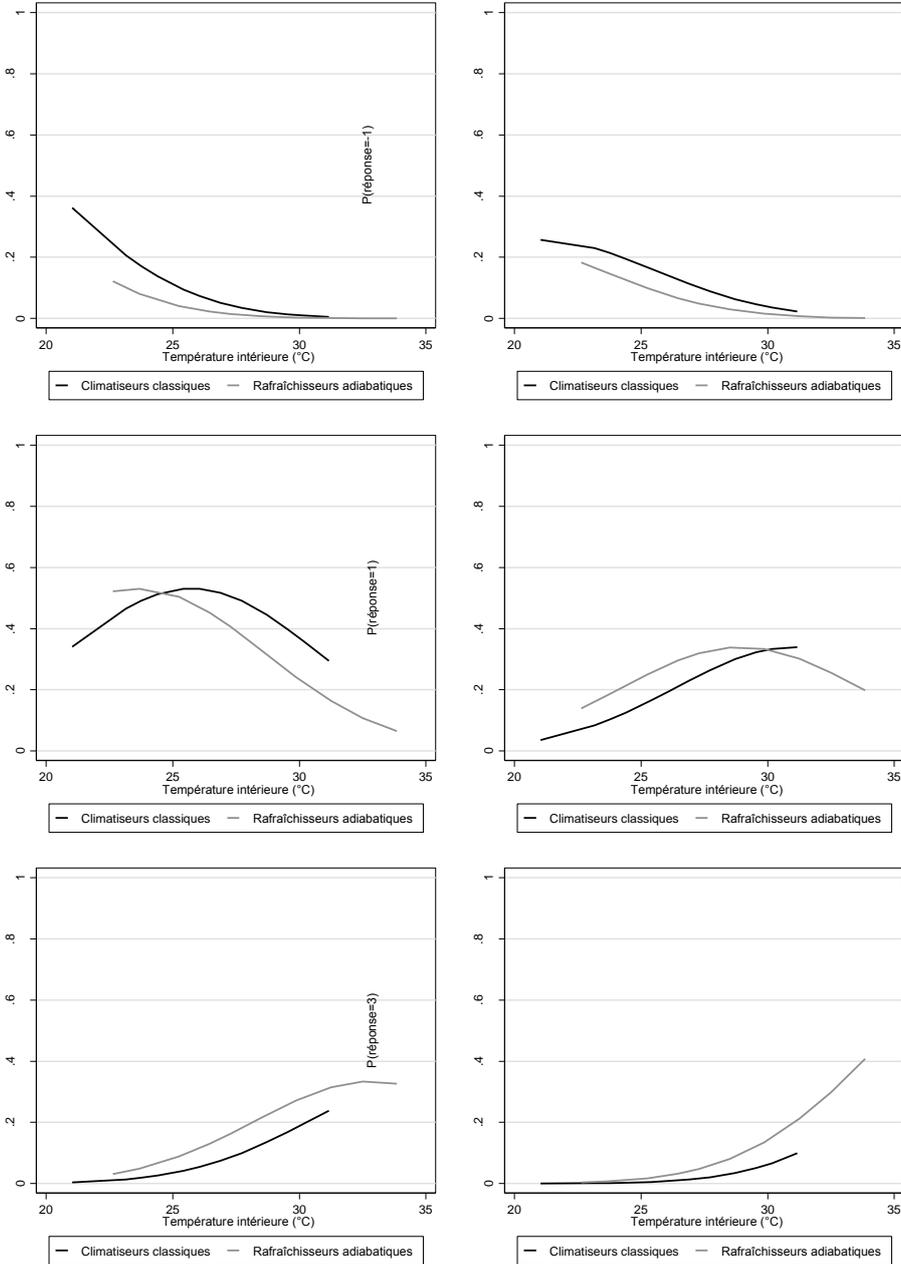


Annexe 18 : Description des catégories d'ambiance intérieure utilisées dans la norme EN 15251

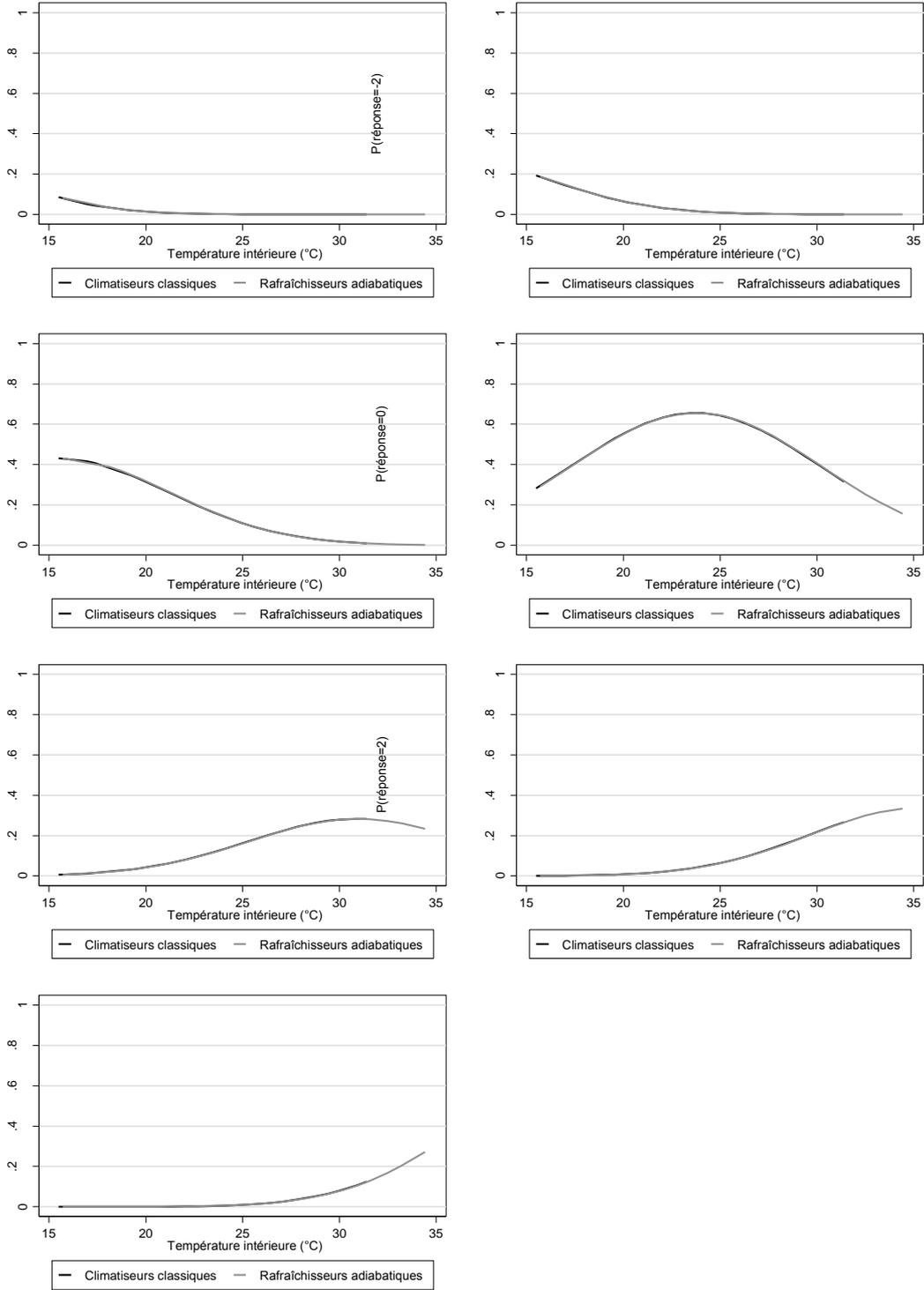
Catégorie	Explication
I	Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.
II	Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.
III	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants
IV	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.

Annexe 19 : Probabilités simulées des réponses en fonction de la température intérieure (température des fenêtres constante) selon le modèle probit

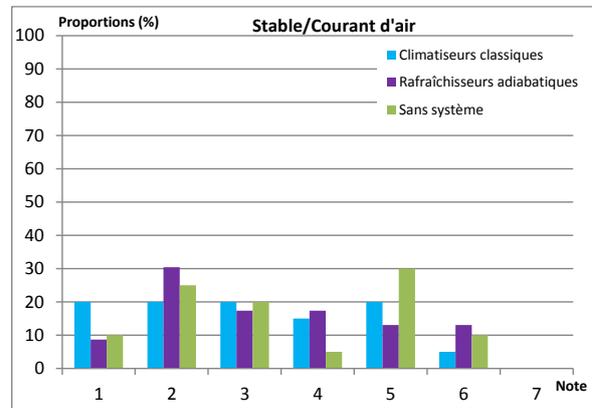
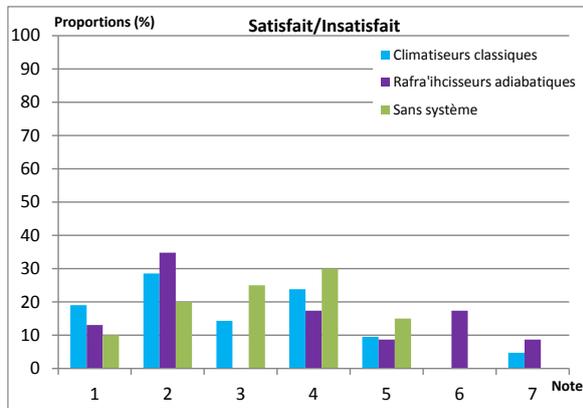
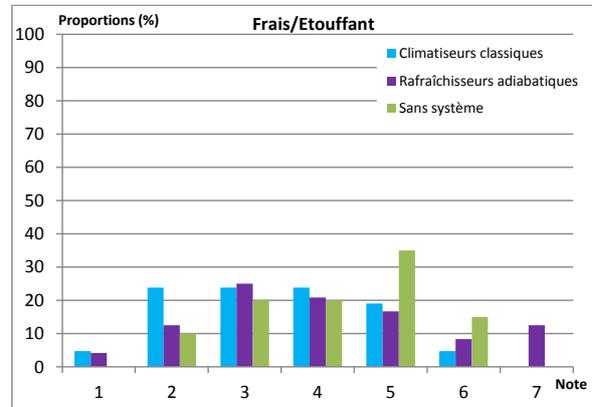
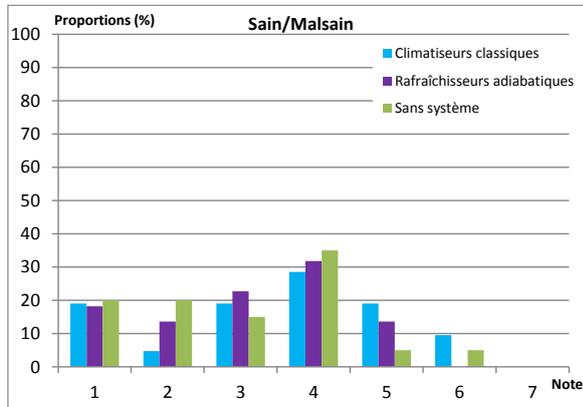
Dispositifs de refroidissement allumés



Dispositifs de refroidissement éteints



Annexe 20 : Réponses aux questions sur la qualité de l'air ; air sain ou malsain en haut à gauche (1 : sain ; 7 : malsain), air frais ou étouffant en haut à droite (1 : frais ; 7 : étouffant), satisfaction en bas à gauche (1 : satisfait ; 7 : insatisfait), stabilité de l'air en bas à droite (1 : stable ; 7 : instable)



Annexe 21 : Réponses aux questions sur la température ; stabilité de la température à gauche (1 : stable ; 7 : instable), confort qu'elle procure à droite (1 : confortable ; 7 : inconfortable)

