

Projet : LowCal, étude du premier bâtiment E4C2 pour massifier la réalisation, à coût maîtrisé, du bâtiment à énergie positive, bas carbone, low-tech, local et sans chauffage

Tâche 2 : High confort
Sous-tâche 2.1 : Confort thermique d'hiver et d'été.

Etude réalisée par ENERTECH avec le soutien de l'ADEME, dans le cadre de son appel à projet recherche « vers les bâtiments responsables à l'horizon 2020 »



Coordination technique ADEME :

Romuald CAUMONT

romuald.caumont@ademe.fr

01 47 65 21 49

Version	Rédigé par	Relu par	Date
1	JS	NA, PC	17/06/2020

Table des matières

1	CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	4
2	METROLOGIE	6
2.1	<i>Instruments de mesures et d’enregistrements</i>	<i>6</i>
2.1.1	Station météo	6
2.1.2	Thermo-hygromètres.....	6
2.1.3	Température de masse du bâtiment	7
2.1.4	Appareil de mesure PMV-PPD	7
2.1.5	Mesures relatives à la ventilation mécanique.....	7
3	RESULTATS DE MESURE.....	9
3.1	<i>Introduction</i>	<i>9</i>
3.2	<i>Données Météo.....</i>	<i>10</i>
3.2.1	Température extérieure	10
3.2.2	Température extérieure en moyenne glissante (NF 15 251)	11
3.2.3	Humidité relative et absolue	13
3.2.4	Pluviométrie.....	14
3.2.5	Irradiance solaire	14
3.2.6	Rose des vents	15
3.3	<i>Confort selon la norme NF EN ISO 7730</i>	<i>16</i>
3.3.1	Présentation des indices PMV et PPD	16
3.3.2	Résultats mesurés.....	18
3.4	<i>Confort d’été.....</i>	<i>22</i>
3.4.1	Evolution des températures sur l’été 2017	23
3.4.2	Evolution de la température sur la semaine la plus chaude	23
3.4.3	Courbes de fréquences cumulées en période d’occupation.....	24
3.4.4	Températures moyennes par locaux.....	25
3.4.5	Implication des occupants	26
3.4.6	Polygones de confort (ASHRAE & COSTIC)	28
3.4.7	Confort adaptatif selon la méthode ASHRAE standard 55	37
3.4.8	Confort adaptatif selon la norme NF15251.....	39
3.5	<i>Confort d’hiver</i>	<i>43</i>
3.5.1	Evolution des températures sur l’hiver 2017-2018.....	43
3.5.2	Evolution des températures lors de la semaine la plus froide dans le bâtiment.....	44

3.5.3	Evolution des températures lors de la semaine la plus froide (T°C extérieure)	45
3.5.4	Courbes de fréquences cumulées en occupation	46
3.5.5	Températures moyennes par locaux	48
3.5.6	Implication des occupants	48
3.5.7	Polygones de confort (ASHRAE & COSTIC)	49
3.5.8	Confort adaptatif selon la norme NF15210	50
3.6	<i>Questionnaire soumis aux occupants</i>	51
4	VENTILATION DOUBLE-FLUX DECENTRALISEE	53
4.1	<i>Equipements et métrologie</i>	53
4.1.1	Equipements	53
4.1.2	Métrologie	54
4.2	<i>Résultats</i>	55
4.2.1	Consommation électrique	55
4.2.2	SFP, débit et taux de renouvellement d’air	59
4.2.3	Concentrations de CO ₂	62
4.2.4	Echangeurs enthalpiques.....	66
4.2.5	Efficacité de la récupération de chaleur	67
5	CONCLUSION GENERALE	69
6	ANNEXE 1 : Polygones de confort par locaux	71
7	ANNEXE 2 : Confort adaptatif NF15251 par locaux	74
8	ANNEXE 3 : Teneurs en eau par CTA	78

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

L’objectif de cette sous-tâche 2.1 est d’évaluer, par la mesure, le confort thermique du bâtiment LowCal en toutes saisons.

Le confort est une notion *a priori* subjective puisque dépendante du ressenti individuel. Il n’est donc pas toujours aisé de l’approcher de manière quantifiée et objective. Des méthodes et des normes ont toutefois été créées dans ce but. Citons par exemple :

- Les indicateurs normatifs statistiques (PMV et PPD),
- L’approche adaptative et comportementale (polygone de confort),
- Les modèles de thermorégulation physiologique,
- Les normes qui intègrent l’écoulement de l’air (courant d’air et degré de turbulence).

Pendant 24 mois (Figure 1), nous avons mesuré le confort dans les locaux du bâtiment LowCal et avons croisé les résultats obtenus avec le ressenti des usagers. Pour cela nous avons enregistré la température et l’hygrométrie au pas de temps de 10 minutes dans chaque pièce (bureaux, salles de réunions, réfectoire) ainsi que les concentrations de CO₂.

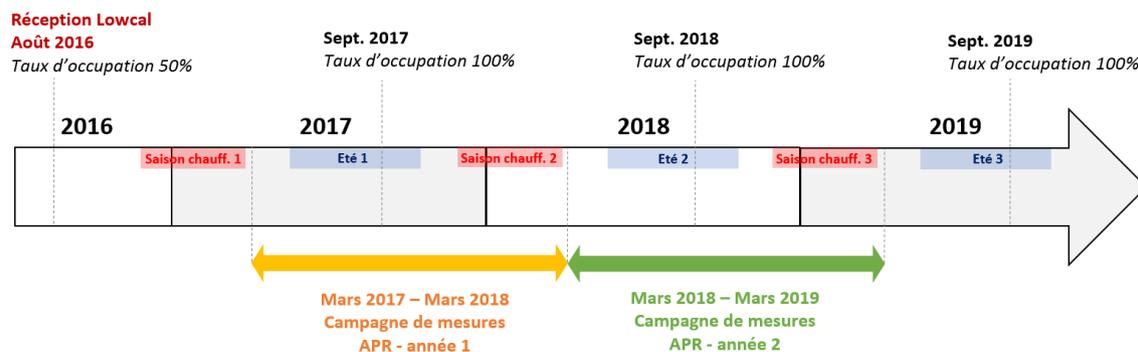


Figure 1 : Calendrier de la campagne de mesures de 24 mois portant sur le bâtiment LowCal.

Afin de compléter l’analyse, nous avons également mesuré pendant une semaine et sur chaque poste de travail, le confort thermique à l’aide d’un appareil portatif comprenant un thermomètre à boule noire, un hygromètre, une sonde de CO₂ et un anémomètre de précision permettant d’en quantifier le confort de manière fine selon les indices normatifs PMV-PPD.

Un volet spécifique de l’étude détaillée portant sur le système de ventilation double-flux décentralisée du bâtiment sera développé au chapitre 4.

Pour rappel, le bâtiment dispose d’une Surface Hors Œuvre Nette (SHON) de 730m² pour 620m² de surface utile (SU) et 626m² de surface de plancher (SDP). Il s’étend sur 3 niveaux (RDJ, RDC, R+1). Il est occupé depuis août 2016. Depuis septembre 2017, nous pouvons considérer que le taux d’occupation du bâtiment est proche de 100% avec environ 25 postes de travail occupés.

Les plans d’étage des niveaux RDC et R+1 sont présentés ci-après en Figure 2. Pour rappel le RDJ, qui n’apparaît pas sur ces plans, abrite une salle de réunion, une salle d’archive ainsi que l’atelier de mesure.

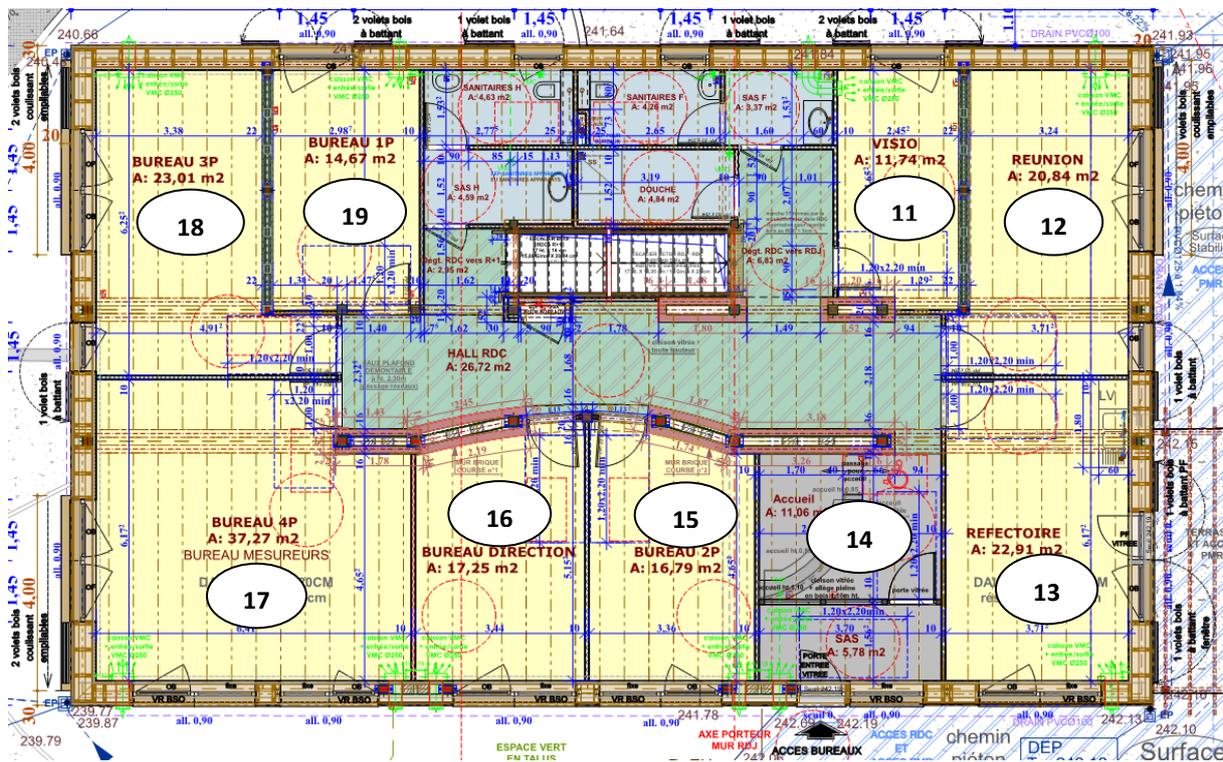
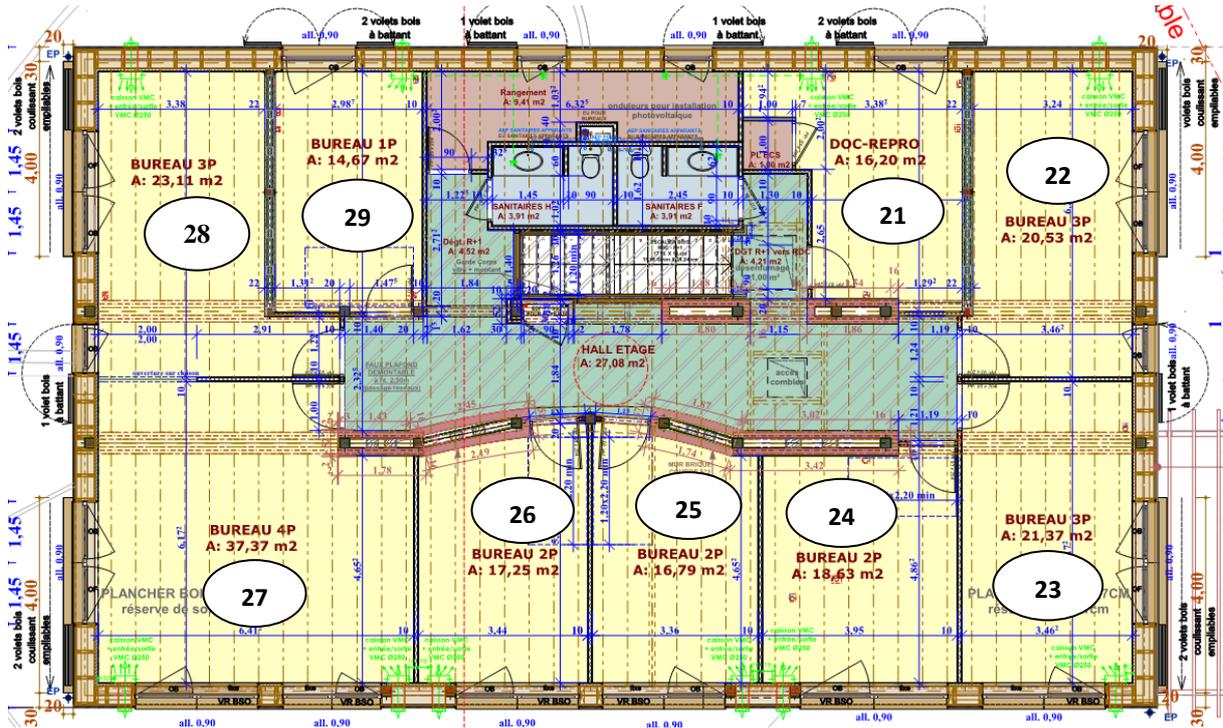


Figure 2 : Plans d’étages des niveaux RDC et R+1 et numérotation des bureaux.

2 METROLOGIE

2.1 Instruments de mesures et d’enregistrements

2.1.1 Station météo

Une station météo communicante CAIPOS a été installée sur le pignon Est du bâtiment. Elle contient les capteurs suivants :

- Un thermo-hygromètre protégé par un abri anti radiation ventilé mécaniquement.
- Une girouette.
- Un anémomètre.
- Un pyranomètre.
- Un pluviomètre



La station est alimentée par un panneau photovoltaïque.

Les données sont transmises par GPRS/3G et archivées sur le serveur du fabricant. Elles sont téléchargeables au pas de temps de 10 minutes sur l’ensemble de la période de mesure.

Time	Battery [mV]	Solar Panel [mV]	Precipitation [mm]	Temperature [°C]	Air pressure [mbar]	Air tempera... [°C]	Relative hu... [%]	Wind speed [m/s]	Wind direct... [Deg]	UVI index [mJ]	Solar radiat... [W/m²]	Leaf Wetness [mV]	SDI12 Volta... [mV]
2018-10-11 00:00	6455	0	0.2	15.68	985	15.14	100	0.5	258	2.54	0	3	3537
2018-10-11 00:10	6461	0	0	16.27	985	15.2	100	0.7	146	2.62	0	3	3537
2018-10-11 00:20	6453	0	0.2	15.86	985	15.23	99.9	0.6	359	2.41	0	3	3537
2018-10-11 00:30	6453	0	0.4	15.77	985	15.3	99.5	1.6	53	2.22	0	2	3537
2018-10-11 00:40	6437	0	0	15.93	985	15.3	99.3	0.6	118	2.17	0	2	3537
2018-10-11 00:50	6450	0	0	15.76	985	15.3	99.5	2.2	272	2.15	0	2	3537
2018-10-11 01:00	6477	0	0.2	15.79	984	15.31	99.3	1.3	76	2.21	0	2	3537
2018-10-11 01:10	6442	0	0	15.92	984	15.38	98.9	1	91	2.07	0	2	3537
2018-10-11 01:20	6447	0	0	15.96	984	15.4	98.4	0.5	319	2	0	2	3539
2018-10-11 01:30	6471	0	0	15.89	985	15.44	98.2	0.8	106	1.97	0	2	3537
2018-10-11 01:40	6445	0	0	15.9	985	15.35	98.7	0.9	180	1.95	0	2	3537
2018-10-11 01:50	6445	0	0	15.77	985	15.3	99	1	114	1.93	0	2	3537
2018-10-11 02:00	6463	0	0	15.71	984	15.25	99.2	1.2	34	1.91	0	2	3537
2018-10-11 02:10	6463	0	0	15.86	984	15.25	99.2	1.5	85	1.91	0	2	3537
2018-10-11 02:20	6447	0	0	15.75	984	15.37	98.4	1.5	81	1.85	0	2	3537
2018-10-11 02:30	6434	0	0	15.98	984	15.5	97.2	0.5	236	1.84	0	2	3537
2018-10-11 02:40	6442	0	0	16.04	984	15.36	97.6	0.3	313	1.84	0	2	3539
2018-10-11 02:50	6445	0	0	15.77	984	15.25	98.5	1.1	253	1.85	0	2	3539
2018-10-11 03:00	6437	0	0	15.72	984	15.2	98.9	0.4	280	1.84	0	2	3537
2018-10-11 03:10	6442	0	0	15.77	984	15.12	99	0.4	144	1.85	0	2	3537
2018-10-11 03:20	6442	0	0	15.67	984	15.04	99.3	0.5	44	1.94	0	2	3537
2018-10-11 03:30	6442	0	0	15.52	984	15	99.7	0.7	261	1.85	0	2	3537
2018-10-11 03:40	6437	0	0	15.6	984	14.95	99.7	0.3	101	1.82	0	2	3537
2018-10-11 03:50	6423	0	0	15.49	984	14.91	99.9	0.1	101	1.81	0	2	3537
2018-10-11 04:00	6434	0	0	15.46	984	14.83	100	0	101	1.9	0	2	3537
2018-10-11 04:10	6437	0	0	15.53	984	14.78	100	0	101	1.84	0	2	3537
2018-10-11 04:20	6418	0	0	15.36	984	14.71	100	0.1	101	1.81	0	2	3539

Figure 3 : Données météo transmises sur le serveur CAIPOS.

2.1.2 Thermo-hygromètres

Le capteur est équipé d’une sonde numérique SHT75 (Sensirion) permettant de mesurer la température et l’hygrométrie ambiantes. Il assure une mesure précise et stable sur le long terme.

26 sondes de ce type ont été mises en place dans le LowCal.

Caractéristiques

Type de capteur	Numérique capacitif (humidité)
Précision	± 2% HR / ± 0,5°C
Alimentation	Pile lithium CR2032
Fréquence d’acquisition	1minute
Pas de temps de stockage	10 minutes
Mémoire	7 mois
Communication	Datalogger
Dimensions	50 x 25 x 15 mm



2.1.3 Température de masse du bâtiment

Le capteur est équipé d’une sonde numérique SHT75 (Sensirion) permettant de mesurer la température ambiante et/ou de contact. Ce capteur a été disposé au centre d’une brique du mur de refend nord afin d’indiquer la « température de masse » du bâtiment.

Un afficheur numérique DI EC avec sonde PT 100 a été mis en place comme indicateur de température et de commande, relié à l’automate asservissant le système de chauffage (Figure 4).

Caractéristiques	
Type de capteur	NPN / Numérique
Précision	1 impulsion / 0,5°C
Alimentation	Pile lithium CR2450
Fréquence d’acquisition	Compte pulses jusque 10Hz
Pas de temps de stockage	De 1 s à 1 heure
Mémoire	> 1an à 1 minute
Communication	Radio 802.15.4 2.4GHz
Dimensions	60 x 35 x 15 mm

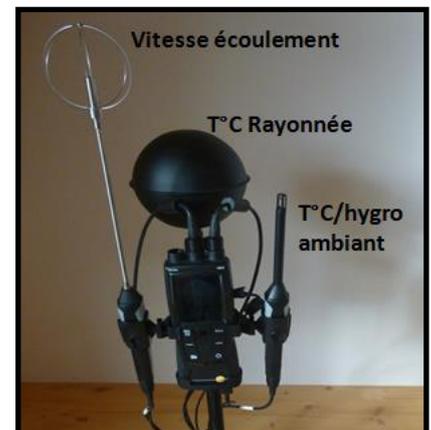


Figure 4 : Dispositif de mesure et affichage de la température de masse du bâtiment.

2.1.4 Appareil de mesure PMV-PPD

Le confort thermique des bureaux, du point de vue de la norme ISO 7730 et des indices PMV et PPD, a été évalué à l’aide des mesures réalisées par l’appareil portatif TESTO 480, équipé des sondes suivantes :

- Thermomètre à globe (TC de type K) pour mesurer la chaleur rayonnante
- « Sonde de bien-être » pour la mesure du degré de turbulence et de la vitesse d’écoulement d’air, selon EN 13779
- Sondes de température et d’humidité relative



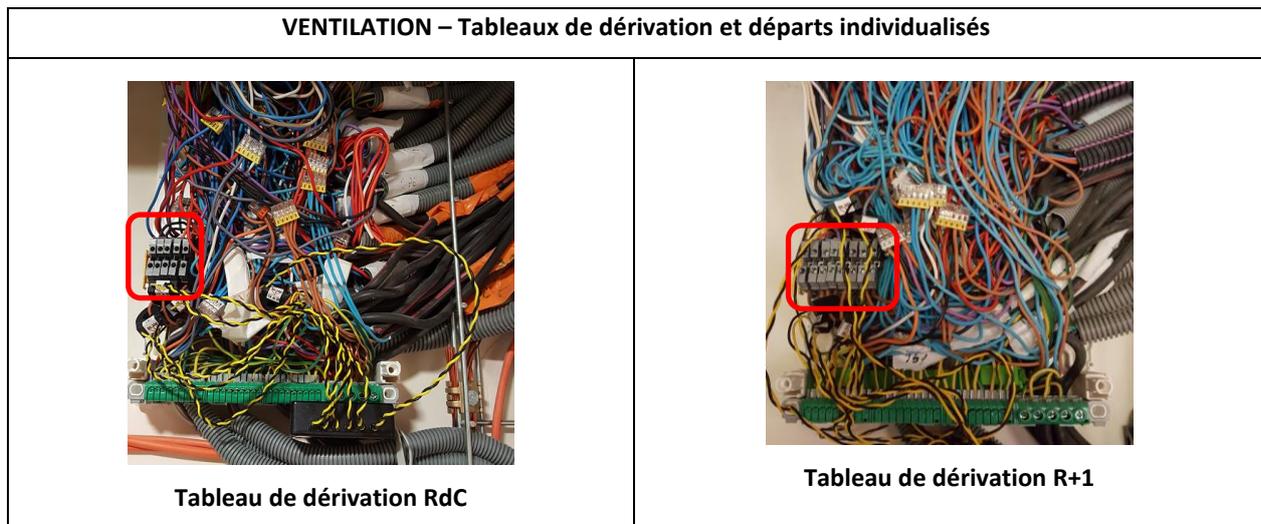
2.1.5 Mesures relatives à la ventilation mécanique

Consommation électrique

Les consommations d’électricité des 5 départs spécifiques « ventilation » du TGBT ont été suivies avec le système Multivoies (Cf. rapport de mesure 1.2).

VENTILATION - Départs spécifiques suivis au TGBT		
- Circuit Ventilation RdJ	- Circuit Ventilation RdC Est	- Circuit Ventilation RdC Ouest
	- Circuit Ventilation R+1 Est	- Circuit Ventilation R+1 Ouest

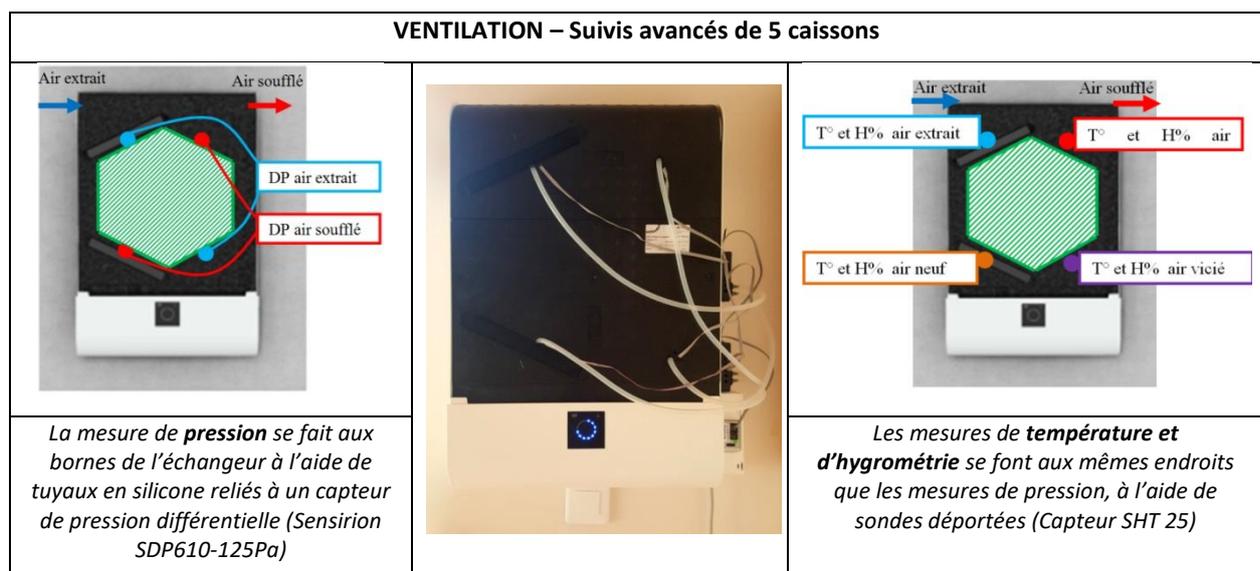
Par ailleurs les consommations d’électricité de 15 caissons de ventilation décentralisés ont pu être enregistrées individuellement à partir des tableaux de dérivation situés au RdJ et au R+1. Les consommations des 6 CTA restantes sont déduites des départs suivis au TGBT :



Débit, température et hygrométrie des flux

La mesure en continu des débits d’air a été effectuée sur 5 caissons de ventilation. Cette mesure de débit se base sur une mesure de différence de pression aux bornes de l’échangeur. La relation mathématique liant la différence de pression au débit a été étalonnée sur l’ensemble des caissons instrumentés grâce à des mesures instantanées de débit pour chaque vitesse de consigne (réglage possible de 1 à 4).

Le matériel mesurant la pression a été spécifiquement développé pour le projet dans le but de pouvoir mesurer de faibles différences de pression.



Enfin 4 thermo-hygromètres sont disposés aux bornes de l’échangeur sur les flux d’air soufflé, air repris, air neuf et air rejeté.

3 RESULTATS DE MESURE

3.1 Introduction

Le confort thermique a été le sujet de nombreux travaux de recherche qui ont permis de quantifier de manière objective le ressenti des utilisateurs (exemple en Figure 5).

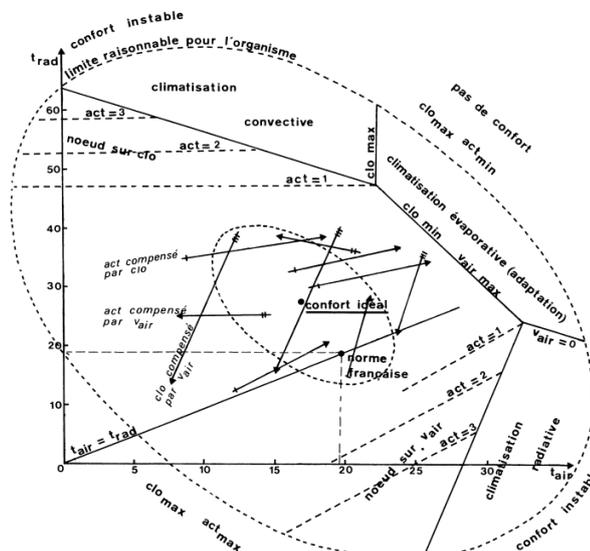


Fig. 36. — Les zones de confort.
[Comfort zones.]

Figure 5: J.-C. Deval. Le confort thermique en climat tempéré. *Revue de Physique Appliquée*, 1984, 19 (7), pp.513-531

On retiendra deux types d’approches pour qualifier ou étudier le confort.

La première approche est l’**approche analytique**. Elle s’appuie sur le calcul du bilan thermique du corps humain, par des modèles physiques et physiologiques essentiellement. L’objectif est de connaître la sensation thermique des occupants grâce à ces modèles physiologiques. Il existe plusieurs modèles analytiques tels que le modèle de Fanger ou celui de Gagge.

La seconde approche est l’**approche adaptative**. Cette approche s’appuie sur des observations *in situ*. C’est à partir de ces observations que de grandes bases de données ont été créées, corrélant les conditions thermiques à l’intérieur des bâtiments et le ressenti des occupants. Une analyse statistique des résultats permet de connaître les combinaisons de paramètres (température, hygrométrie, vitesse de l’air, etc.) considérées comme neutres ou confortables par les occupants.

Cette approche a suscité plus d’intérêt lorsque des chercheurs ont montré qu’en appliquant les indices établis par l’approche analytique à leurs bases de données, le confort prévu ne correspondait pas toujours au confort perçu par les occupants. Ils ont remarqué que l’écart entre la perception du confort et sa définition analytique était moins important dans les bâtiments climatisés que dans les bâtiments non climatisés. En effet, les conditions, dans les bâtiments climatisés s’approchent souvent des conditions statiques des chambres climatiques qui ont servi à développer les outils de l’approche analytique.

En revanche, dans les bâtiments non climatisés, les conditions sont dynamiques et suivent notamment les changements du climat extérieur. C’est la raison pour laquelle certains chercheurs ont approfondi la thèse de « l’adaptation » selon laquelle des facteurs de contexte influencent la perception du confort thermique (climat, région, type de bâtiment).

3.2 Données Météo

3.2.1 Température extérieure

La Figure 6 compare les données horaires des températures extérieures de la station météorologique CAIPOS disposée sur le bâtiment, avec celles de la station météo France de Ancône qui se trouve à 23 km à vol d’oiseau.

On constate que les valeurs de températures se superposent comme le laissait prévoir la proximité géographique des deux stations.

La station CAIPOS n’ayant été installée que le 19/05/2017, les données de la station de Ancône ont donc été intégrées pour combler les données manquantes sur la période du 10/03/2017 au 19/05/2017. On notera également que les données météo France des 5 jours consécutifs (du 15/05/2017 au 19/05/2017) ont été utilisées pour l’étude du confort d’été (période de 243 jours répartis sur les étés 2017 et 2018).

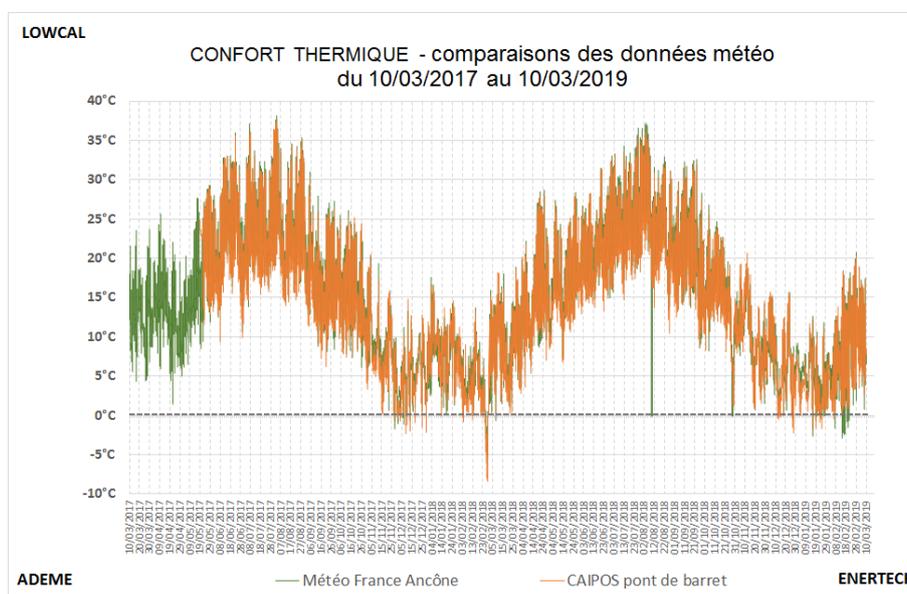


Figure 6 : Températures ambiantes des stations météo CAIPOS (LowCal) et Ancône situé à 23km.

Les statistiques mensuelles des températures extérieures mesurées durant la campagne (mars 2017 à mars 2019) sont présentées dans le Tableau 1. Les hivers concernés se situent dans la moyenne des 20 dernières années (Figure 7).

Température extérieure 2017 (°C)					Température extérieure 2018 (°C)					Température extérieure 2019 (°C)				
Année	Mois	Moyenne	Minimum	Maximum	Année	Mois	Moyenne	Minimum	Maximum	Année	Mois	Moyenne	Minimum	Maximum
2017	janvier	-	-	-	2018	janvier	8,5 °C	-0,4 °C	17,0 °C	2019	janvier	4,0 °C	-2,0 °C	12,3 °C
2017	février	-	-	-	2018	février	3,1 °C	-8,7 °C	13,6 °C	2019	février	7,3 °C	-1,0 °C	20,5 °C
2017	mars	13,3 °C	3,9 °C	23,9 °C	2018	mars	8,7 °C	0,2 °C	19,0 °C	2019	mars	10,6 °C	2,4 °C	19,0 °C
2017	avril	13,4 °C	1,0 °C	25,8 °C	2018	avril	14,8 °C	2,5 °C	28,3 °C	2019	avril	-	-	-
2017	mai	17,6 °C	4,3 °C	29,3 °C	2018	mai	16,6 °C	6,7 °C	28,2 °C	2019	mai	-	-	-
2017	juin	22,4 °C	8,9 °C	36,3 °C	2018	juin	20,8 °C	12,8 °C	32,2 °C	2019	juin	-	-	-
2017	juillet	23,4 °C	11,3 °C	36,8 °C	2018	juillet	24,7 °C	14,4 °C	36,2 °C	2019	juillet	-	-	-
2017	août	23,5 °C	13,8 °C	37,9 °C	2018	août	23,9 °C	10,1 °C	36,4 °C	2019	août	-	-	-
2017	septembre	16,7 °C	6,1 °C	30,3 °C	2018	septembre	20,2 °C	8,5 °C	32,4 °C	2019	septembre	-	-	-
2017	octobre	14,8 °C	3,7 °C	25,9 °C	2018	octobre	14,7 °C	1,1 °C	25,7 °C	2019	octobre	-	-	-
2017	novembre	7,8 °C	-1,3 °C	20,7 °C	2018	novembre	10,2 °C	0,9 °C	20,8 °C	2019	novembre	-	-	-
2017	décembre	4,8 °C	-2,7 °C	15,0 °C	2018	décembre	6,6 °C	-2,3 °C	16,1 °C	2019	décembre	-	-	-

Tableau 1 : Températures extérieures enregistrées en 2018 par la station météo de LowCal.

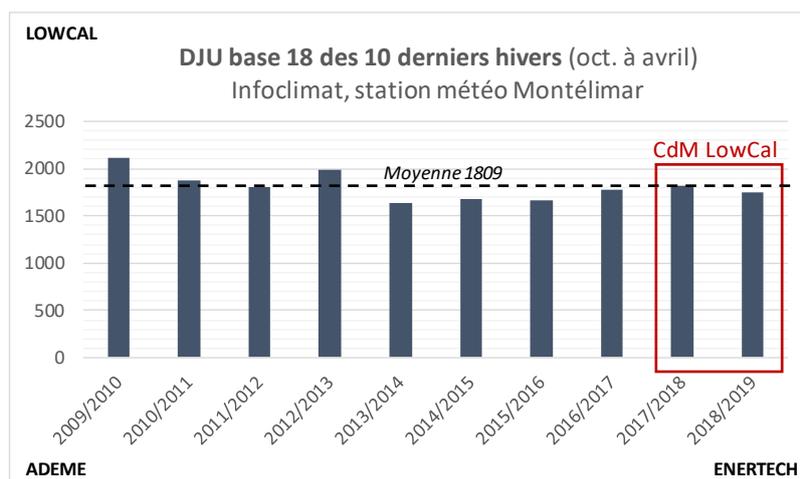


Figure 7 : DJU des 10 derniers hivers à Montélimar (Infoclimat).

Records estivaux (mars 2017 – mars 2019)

- Le record de température maximale a été de 37,9 °C enregistrée le 03/08/2017 à 15h00.
- Le jour le plus chaud a été le samedi 04/08/2018 avec une moyenne journalière de 29,6°C.
- La semaine la plus chaude s’est déroulée du 30/07/2018 au 05/08/2018, avec une moyenne hebdomadaire de 28,6°C.

Records hivernaux (mars 2017 – mars 2019)

- Le record de température minimale a été de -8,7 °C enregistrée le 28/02/2018 à 01h00.
- Le jour le plus froid a été le mardi 27/02/2018 avec une moyenne journalière négative de -5,0°C.
- La semaine la plus froide s’est déroulée du 26/02/2018 au 04/03/2018 avec une moyenne hebdomadaire de 2,4°C.

Le Tableau 2 synthétise les différents records mesurés entre mars 2017 et mars 2019.

	Records de chaleur	Records de froid
Horaire	37,9°C	-8,7°C
Journalier	29,6°C	-5,0°C
Hebdomadaire	28,6°C	2,4°C

Tableau 2: Synthèse des records de température enregistrés de mars 2017 à mars 2019.

3.2.2 Température extérieure en moyenne glissante (NF 15 251)

La Figure 8 présente l’évolution de la température extérieure en moyenne glissante telle que définie dans l’approche adaptative NF15251 en utilisant un facteur mémoire de 0.8 (valeur

recommandée, Cf. Figure 9). Cette méthode de calcul est décrite plus en détails dans le chapitre 3.4.8, Figure 52.

La période « hivernale » sélectionnée pour l’étude du confort hygrothermique s’étale du 10/12/2017 au 10/03/2018 puis du 10/12/2018 au 10/03/2019.

La période « estivale » sélectionnée pour l’étude du confort hygrothermique s’étale du 15/06/2017 au 15/09/2017 puis du 15/06/2018 au 15/09/2018.

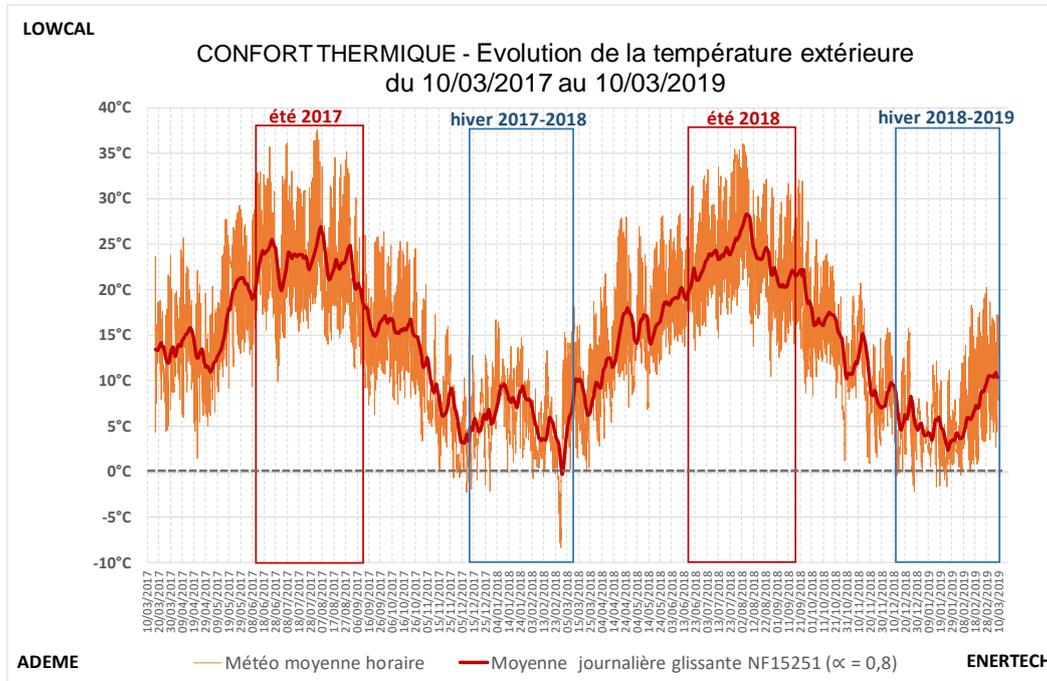


Figure 8: Evolution de la température extérieure et moyenne journalière glissante (NF 15 251).

3.11 température extérieure moyenne journalière glissante

moyenne glissante pondérée exponentiellement de la température d'air extérieure moyenne journalière Θ_{ed} exprimée sous forme de série et calculée selon la formule :

$$\Theta_m = (1 - \alpha) \cdot (\Theta_{ed-1} + \alpha \cdot \Theta_{ed-2} + \alpha^2 \cdot \Theta_{ed-3} \dots) \quad \dots (1)$$

Cette équation peut être simplifiée comme suit :

$$\Theta_m = (1 - \alpha) \Theta_{ed-1} + \alpha \cdot \Theta_{m-1} \quad \dots (2)$$

où :

- Θ_m est la température moyenne glissante du jour ;
- Θ_{m-1} est la température moyenne glissante de la veille ;
- Θ_{ed-1} est la température moyenne journalière extérieure de la veille ;
- Θ_{ed-2} est la température moyenne journalière extérieure de l'avant-veille, etc. ;
- α est une constante comprise entre 0 et 1. Il est recommandé d'utiliser 0,8.

L'équation approchée suivante peut être utilisée lorsque les enregistrements de la température moyenne journalière extérieure ne sont pas disponibles :

$$\Theta_m = (\Theta_{ed-1} + 0,8 \Theta_{ed-2} + 0,6 \Theta_{ed-3} + 0,5 \Theta_{ed-4} + 0,4 \Theta_{ed-5} + 0,3 \Theta_{ed-6} + 0,2 \Theta_{ed-7}) / 3,8 \quad \dots (3)$$

Figure 9: Extrait de la norme NF EN 15251¹ (août 2007) concernant la température extérieure moyenne journalière glissante.

¹ 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 (Indice de classement : E51-762)

3.2.3 Humidité relative et absolue

La Figure 10 illustre l’humidité relative extérieure mesurée entre le 19/05/2017 et le 10/03/2019. L’humidité relative moyenne mesurée sur cette période est de 73%.

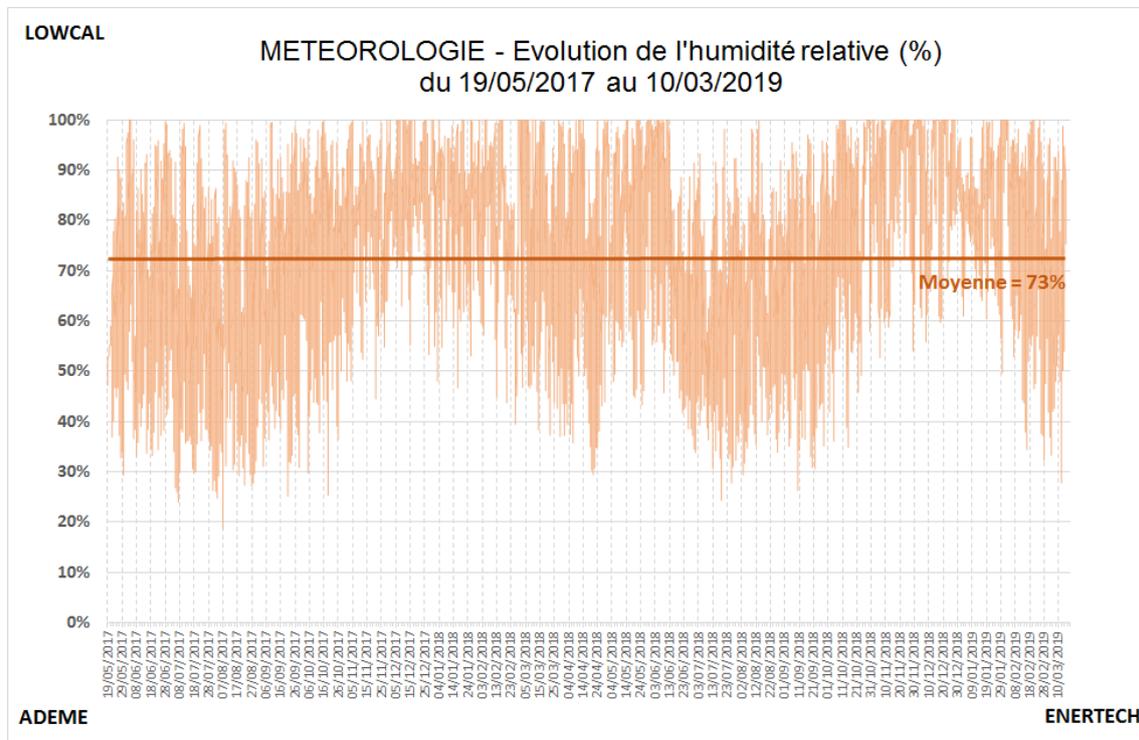


Figure 10: Evolution de l’humidité relative.

Les statistiques mensuelles d’humidité relative et absolue sont présentées dans le Tableau 3.

Année 2017								Année 2018							
Année	Mois	Humidité relative (%)			Humidité absolue (g/kgair_sec)			Année	Mois	Humidité relative (%)			Humidité absolue (g/kgair_sec)		
		Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum			Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum
2017	janvier	-	-	-	-	-	-	2018	janvier	82 %	43 %	100 %	5,6	3,2	8,7
2017	février	-	-	-	-	-	-	2018	février	79 %	38 %	100 %	3,9	1,2	8,0
2017	mars	-	-	-	-	-	-	2018	mars	77 %	36 %	100 %	5,3	2,4	8,9
2017	avril	-	-	-	-	-	-	2018	avril	69 %	29 %	100 %	7,0	3,5	11,6
2017	mai	59 %	29 %	93 %	9,3	6,2	12,0	2018	mai	80 %	40 %	100 %	9,4	5,6	14,2
2017	juin	66 %	32 %	100 %	10,9	5,3	17,9	2018	juin	71 %	31 %	100 %	10,7	6,7	14,7
2017	juillet	60 %	23 %	100 %	10,2	7,1	15,9	2018	juillet	60 %	22 %	99 %	11,2	6,8	15,4
2017	août	59 %	16 %	100 %	10,3	5,2	15,3	2018	août	62 %	27 %	100 %	11,3	6,0	16,6
2017	septembre	66 %	23 %	100 %	7,6	4,6	11,9	2018	septembre	65 %	26 %	98 %	9,3	5,2	13,7
2017	octobre	73 %	24 %	100 %	7,5	4,2	11,9	2018	octobre	78 %	34 %	100 %	8,1	4,1	13,2
2017	novembre	80 %	44 %	100 %	5,3	3,1	9,8	2018	novembre	89 %	49 %	100 %	6,9	4,0	10,1
2017	décembre	87 %	53 %	100 %	4,7	2,8	8,5	2018	décembre	89 %	55 %	100 %	5,5	3,1	9,8

Année 2019							
Année	Mois	Humidité relative (%)			Humidité absolue (g/kgair_sec)		
		Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum
2019	janvier	83 %	48 %	100 %	4,2	2,6	6,9
2019	février	79 %	32 %	100 %	4,9	3,4	7,5
2019	mars	69 %	33 %	99 %	5,4	3,5	8,5
2019	avril	-	-	-	-	-	-
2019	mai	-	-	-	-	-	-
2019	juin	-	-	-	-	-	-
2019	juillet	-	-	-	-	-	-
2019	août	-	-	-	-	-	-
2019	septembre	-	-	-	-	-	-
2019	octobre	-	-	-	-	-	-
2019	novembre	-	-	-	-	-	-
2019	décembre	-	-	-	-	-	-

Tableau 3 : Hygrométrie enregistrée à 10min. par la station météo de LowCal.

On note surtout le caractère très saisonnier de la donnée hygrométrique :

- En hiver des valeurs d’hygrométrie relative de l’ordre de 80 à 90% et des valeurs d’hygrométrie absolue de l’ordre de 5 g_{eau}/kg_{airsec} (peu d’eau dans l’air),
- En été des valeurs d’hygrométrie relative de l’ordre de 60 à 70% et des valeurs d’hygrométrie absolue de l’ordre de 10 g_{eau}/kg_{airsec} (deux fois plus d’eau dans l’air qu’en hiver).

3.2.4 Pluviométrie

La Figure 11 illustre le cumul mensuel des précipitations et le nombre de jours par mois où les précipitations excèdent 1 mm, entre le 19/05/2017 et le 10/03/2019.

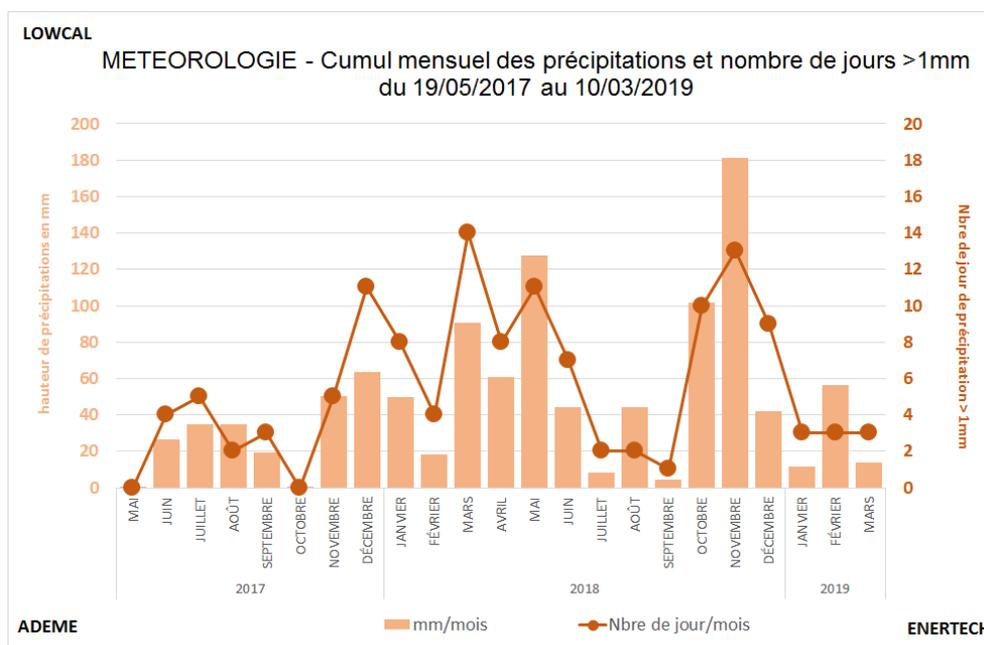


Figure 11: Evolution des précipitations mesurées par la station météo de LowCal.

Sur l’année 2018, le cumul a été de 772 mm ce qui est proche des 800 mm moyens attendus dans le sud de la Drôme.

3.2.5 Irradiance solaire

La Figure 12 illustre l’irradiance solaire mesurée par la station de LowCal entre le 19/05/2017 et le 10/03/2019. L’irradiance moyenne mesurée sur cette période est de 177 W/m² (soit 1,55 MWh/m²/an).

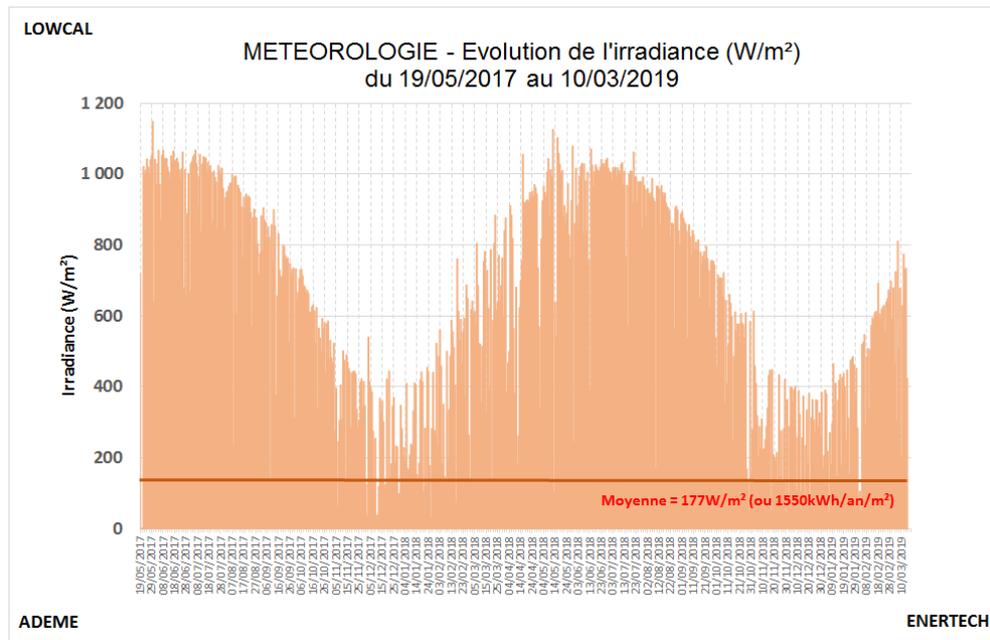


Figure 12: Irradiance solaire mesurée sur l’horizontale par la station météo de LowCal.

La Figure 13 montre le taux d’ensoleillement en hiver (octobre à avril) des 10 dernières années sur une station météo Infoclimat proche de LowCal. On constate que les deux années concernées par la présente campagne de mesure sont des années assez proches de la moyenne sur 10 ans, avec toutefois 15% de soleil en moins dans l’hiver 2017/2018 par rapport à l’hiver 2018/2019.

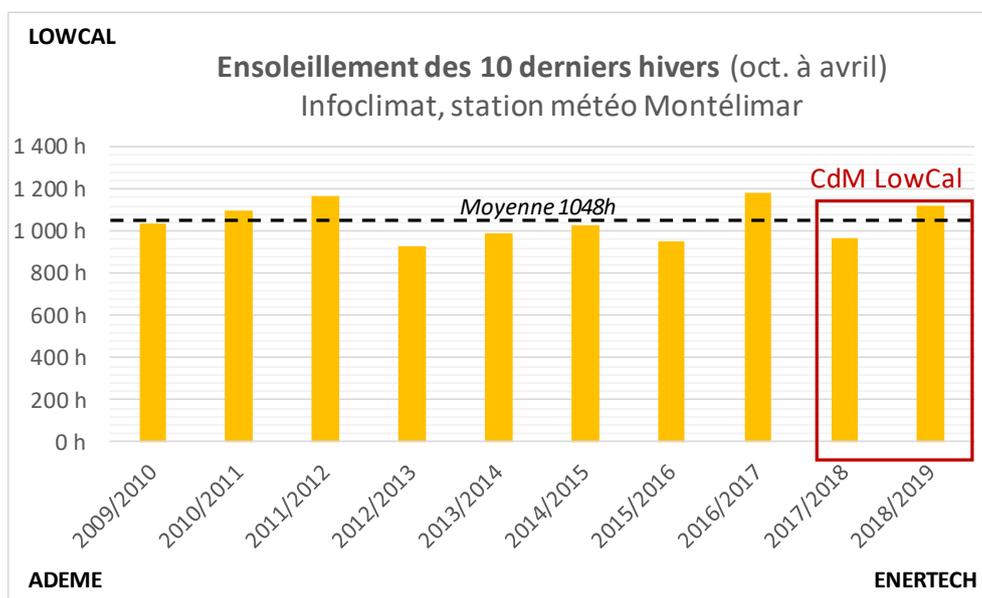


Figure 13 : Ensoleillement hivernal des 10 derniers hivers (Infoclimat, station météo de Montélimar).

3.2.6 Rose des vents

La Figure 14 illustre l’orientation et la vitesse du vent entre le 19/05/2017 et le 10/03/2019. La rose des vents est assez caractéristique du Mistral, le vent dominant de la vallée du Rhône, qui s’infiltré jusque dans les Préalpes du sud de la Drôme avec des turbulences locales susceptibles de le dévier de son axe dominant nord/sud.

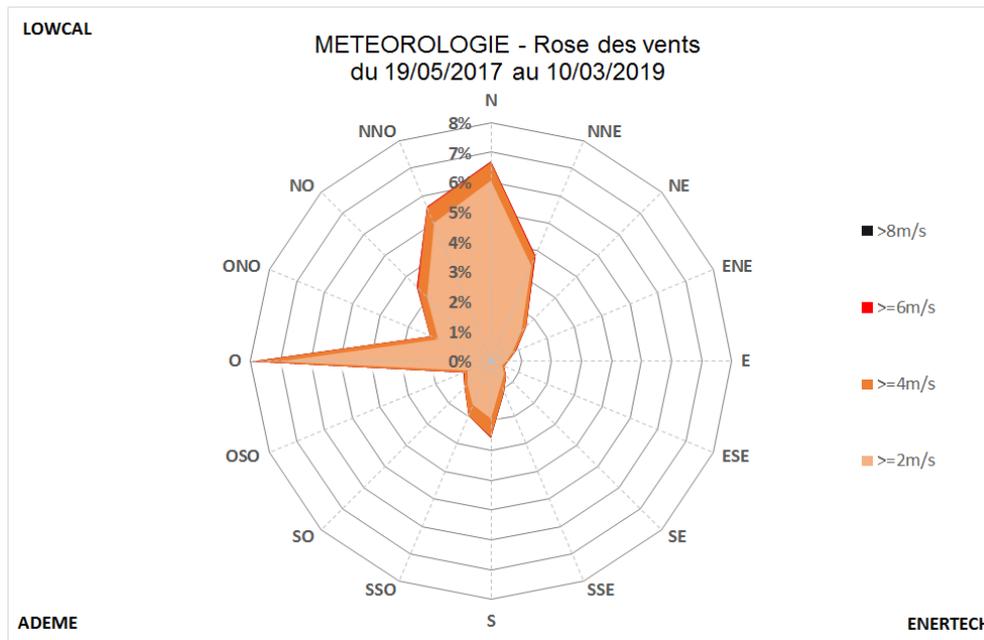


Figure 14: Vitesse et orientation du vent mesurées par la station météo de LowCal. Les données sont utilisées à 10 min. L'axe radial des ordonnées indique le pourcentage cumulé du temps où le vent a soufflé dans cette direction ($\pm 11.25^\circ$) et selon la plage de vitesse indiquée. NB : Vitesse nulle mesurée pendant 58% du temps.

3.3 Confort selon la norme NF EN ISO 7730

3.3.1 Présentation des indices PMV et PPD

Le modèle prédictif de FANGER, utilisé par la norme ISO 7730, évalue le confort sur une échelle élaborée statistiquement sur le ressenti d'un grand nombre de personnes (**indice PMV**). En raison des spécificités de chaque individu, il pose comme principe qu'une ambiance thermique satisfaisante pour tous est difficile à obtenir et qualifie donc le confort thermique en fonction d'un « pourcentage d'insatisfaction » (**indice PPD**).

Ainsi l'indice PMV prédit la valeur moyenne des votes d'un grand groupe de personnes² sur l'échelle de sensation thermique graduée de -3 à +3 :

- +3** : très chaud
- +2** : chaud
- +1** : légèrement chaud
- 0** : ni chaud, ni froid
- 1** : légèrement froid
- 2** : froid
- 3** : très froid

Cet indice PMV s'appuie sur l'équation du bilan thermique d'une personne et est déterminé en fonction du métabolisme, de la résistance thermique des vêtements et des paramètres climatiques (température et humidité de l'air, température de rayonnement des parois,

² Ces 2 indices PMV et PPD proviennent d'études statistiques sur des résultats d'expérimentations concernant 1300 sujets nord-américains et européens et utilisant des chambres climatiques calibrées.

vitesse d’écoulement de l’air). L’indice PPD quantifie le taux d’insatisfaction correspondant à chaque niveau du PMV (Figure 15).

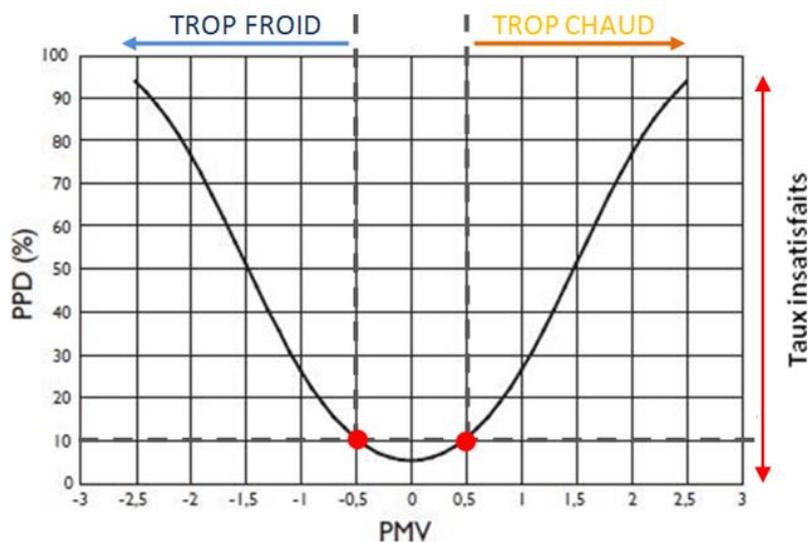


Figure 15 : Pourcentage prévisible de personnes insatisfaites (PPD) en fonction du vote moyen prévisible (PMV).

Dans la situation optimale (PMV = 0, ni chaud ni froid), le taux d’insatisfaction est de 5% parmi des personnes connaissant les mêmes conditions thermiques, métaboliques et vestimentaires. C’est le taux minimum d’insatisfaction (confort maximum). Le PPD augmente ensuite lorsque le PMV s’écarte de 0 vers le froid et vers le chaud.

Pour obtenir une situation de confort thermique, il est recommandé que le PPD soit inférieur à 10%, ce qui correspond à un PMV compris entre -0,5 et +0,5.

Durée et pas de temps

Les mesures PMV-PPD de chaque poste de travail ont été réalisées sur plusieurs jours (1 à 5 jours ouvrés) au pas de temps de 10 minutes.

Le guide pratique « *Mesure du bien-être sur le lieu de travail* » de l’appareil de mesure utilisé (Cf §2.1.4) propose la démarche de mesure suivante :

« *Si un collaborateur se plaint, par exemple, d’un inconfort thermique constant sur son lieu de travail, il suffit souvent de procéder à une mesure rapide, de quelques minutes, pour se faire une idée des conditions thermiques. Si le collaborateur ne se plaint que de manière ponctuelle, à différents moments, des conditions thermiques, une mesure de longue durée, étendue sur toute la journée, est intéressante.* »

Paramètres de saisies Clo. et Met.

Le paramètre de saisie des vêtements a été adapté en fonction de la tenue des occupants au moment de l’installation. Les ajouts/retraits (gilet ou veste par exemple) au fil de la journée et au fil des jours ne sont pas pris en compte.

Le paramètre de saisie du métabolisme est systématiquement de 1 (activité assise ; 58-59 W/m²).

Paramètres de saisie – Vêtements			Paramètre de saisie - Activités		
Paramètre en clo	Paramètre en m2K/W	Explication	Paramètre en met	Paramètre en W/m2	Explication
0 – 0,02		Aucun vêtement	0,1 – 0,7	6 – 45	Couché, détendu
0,03 – 0,29	0,005 – 0,045	Sous-vêtements	0,8 – 0,9	46 – 57	Assis, détendu
0,30 – 0,49	0,046 – 0,077	Short et t-shirt	1,0 – 1,1	58 – 59	Activité assise
0,50 – 0,79	0,078 – 0,122	Pantalon et t-shirt	1,2 – 1,5	70 – 92	Debout
0,80 – 1,29	0,123 – 0,200	Costume léger	1,6 – 1,7	93 – 104	Debout, activité légère
1,30 – 1,79	0,201 – 0,277	Costume chaud	1,8 – 1,9	105 – 115	Debout, activité modérée
1,80 – 2,29	0,278 – 0,355	Veste ou manteau	2,0 – 2,3	116 – 139	Marche lente
2,30 – 2,79	0,356 – 0,432	Vêtements d'hiver chaud	2,4 – 2,9	140 – 174	Marche rapide
2,80 – 3,00	0,433 – 0,465	Vêtements d'hiver très chaud	3,0 – 3,4	175 – 203	Activité intense

Tableau 4 : Paramètres de prise en compte des taux d’habillement (Clo.) et d’activité (Met.)

3.3.2 Résultats mesurés

La Figure 16 présente sur une même courbe l’ensemble des points mesurés sur 13 postes de travail entre le 21/08/2017 et le 05/03/2019 (mélange de périodes estivales et hivernales) en période d’occupation.

Nous pouvons constater une part plus importante de points PMV allant de « légèrement froid » à « froid » sur l’ensemble des postes mesurés.

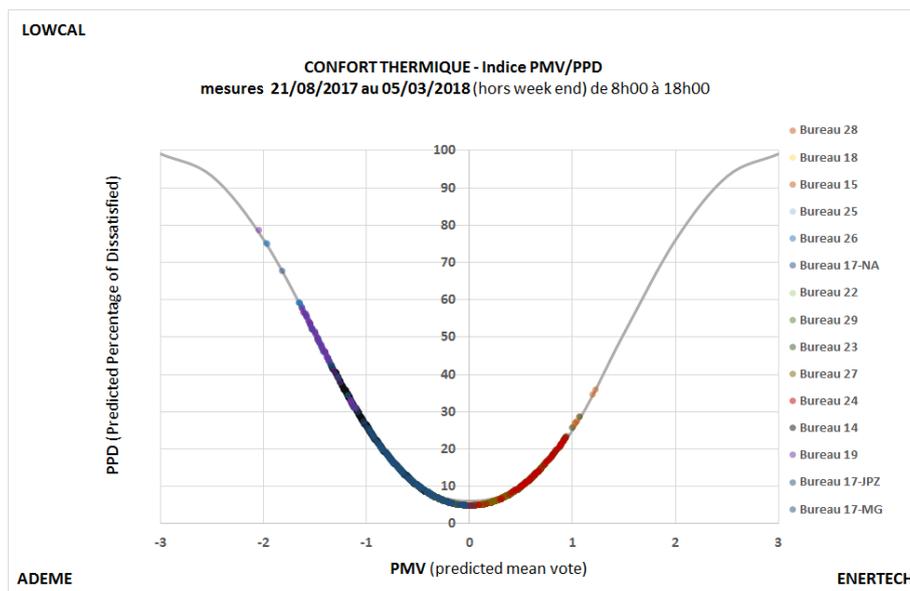


Figure 16: Ensemble des mesures PMV PPD effectuées à Lowcal.

Si l’on considère la moyenne des résultats PMV-PPD de chacun des bureaux suivis, moins de 14% des occupants seraient insatisfaits jugeant la température « très légèrement froide » (PMV -0,2 ; Cf Tableau 5).

La Figure 17 illustre les valeurs moyennes des résultats PMV-PPD bureau par bureau. Nous pouvons constater que les bureaux ayant une part importante de points PMV allant de « légèrement froid » à « froid » ont été paramétrés avec un Clo de 0,5 (mesure effectuée en été dans ces bureaux), tandis que les autres bureaux avec des indices PMV positifs ont un paramétrage Clo de 1 à 1,5 (mesure effectuée en automne-hiver dans ces bureaux).

Les valeurs du Bureau 19 (44% d’insatisfaction en période estivale) peuvent s’expliquer par son orientation Nord et d’importantes périodes d’inoccupation.

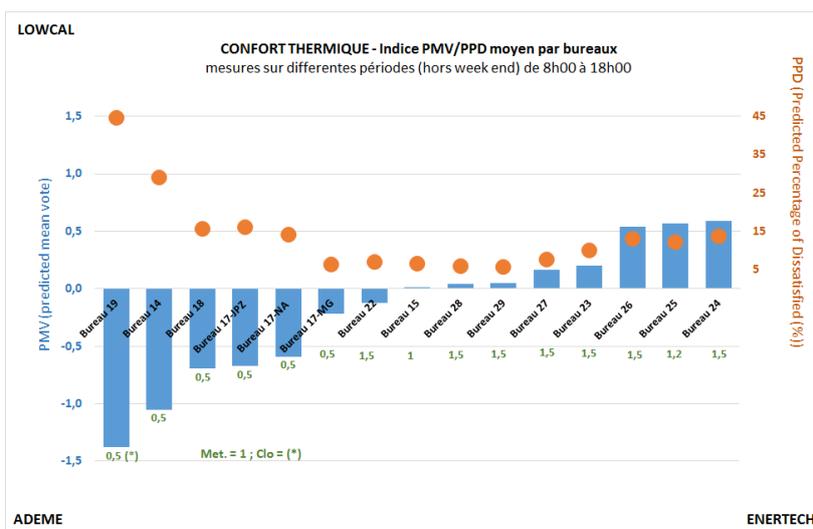


Figure 17: Valeurs moyennes des PMV PPD par bureau.

Nous retenons de cette analyse que les inconforts estivaux principaux sont des inconforts « trop froids » mesurés en été, dans un bâtiment pourtant non climatisé !

Le Tableau 5 reprend, par ordre chronologique (du 21/08/2017 au 05/03/2019), les résultats des différents bureaux suivis. Les couleurs de l’indice PMV vont du bleu marine pour le ressenti le plus froid au rouge pour le plus chaud. Les couleurs de l’indice PPD vont du vert pour la part la moins importante d’insatisfaction au rouge pour la plus importante.

Nous voyons ici que les mesures présentant le plus d’insatisfaction liée au froid ont été relevées en août et en septembre. A partir d’octobre, les mesures présentent un taux d’insatisfaction moins important. De plus, ces insatisfactions sont liées à des températures jugées trop chaudes.

	Période de mesure	BUREAUX	PMV	PPD	Met	Clo	
Aout 2017	du 21 au 25/08/2017	Bureau 17-NA	-0,6	14,1%	1	0,5	} Tenue « été »
	du 28/08 au 29/08/2017	Bureau 17-MG	-0,2	6,4%	1	0,5	
Septembre 2017	du 31/08 au 04/09/2017	Bureau 17-JPZ	-0,7	16,0%	1	0,5	
	du 05 au 06/09/2017	Bureau 18	-0,7	15,7%	1	0,5	
	du 07 au 08/09/2017	Bureau 19	-1,4	44,5%	1	0,5	
	du 08 au 11/09/2017	Bureau 14	-1,1	29,0%	1	0,5	
	du 11/09 au 18/09/2017	Bureau 15	0,0	6,6%	1	1	
Novembre 2017	19/09/2017	Bureau 25	0,6	12,2%	1	1,2	} Tenue « mi-saison »
	du 14 au 15/11/2017	Bureau 24	0,6	13,6%	1	1,5	
	21/11/2017	Bureau 26	0,5	13,0%	1	1,5	
Decembre 2017	du 01 au 08/12/2017	Bureau 27	0,2	7,6%	1	1,5	} Tenue « hiver »
Janvier 2017	du 11 au 15/01/2018	Bureau 28	0,0	5,9%	1	1,5	
	du 18 au 22/01/2018	Bureau 29	0,1	5,6%	1	1,5	
Fevrier 2018	du 09 au 14/02/2018	Bureau 22	-0,1	6,9%	1	1,5	
	du 20/02 au 05/03/2018	Bureau 23	0,2	10,0%	1	1,5	
MOYENNE			-0,2	13,8%			

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes des PMV-PPD mesurées.

La Figure 18 illustre à titre indicatif l’impact du paramètre « Clo » (tenue vestimentaire) sur le niveau de température jugé satisfaisant dans la littérature. Par exemple, pour une activité assise (Met. = 1) et une tenue d’été (Clo. =0,5), la température de confort est de 27°C, contre

21,5 °C avec une tenue d’hiver (Clo. =1,5). Ces seuils permettent de mieux saisir les résultats présentés dans le Tableau 5, selon lesquels les conditions de confort à Lowcal peuvent être interprétées – paradoxalement – comme légèrement fraîches en été et chaudes en hiver (voir les températures mesurées aux paragraphes 3.4.1 (été) et 3.5.1 (hiver)).

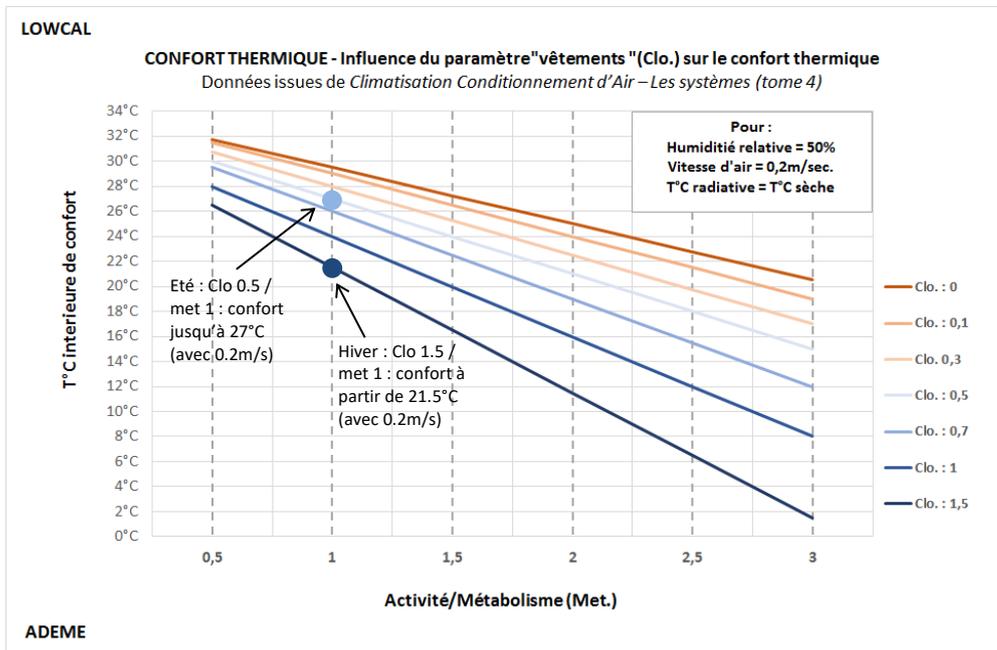
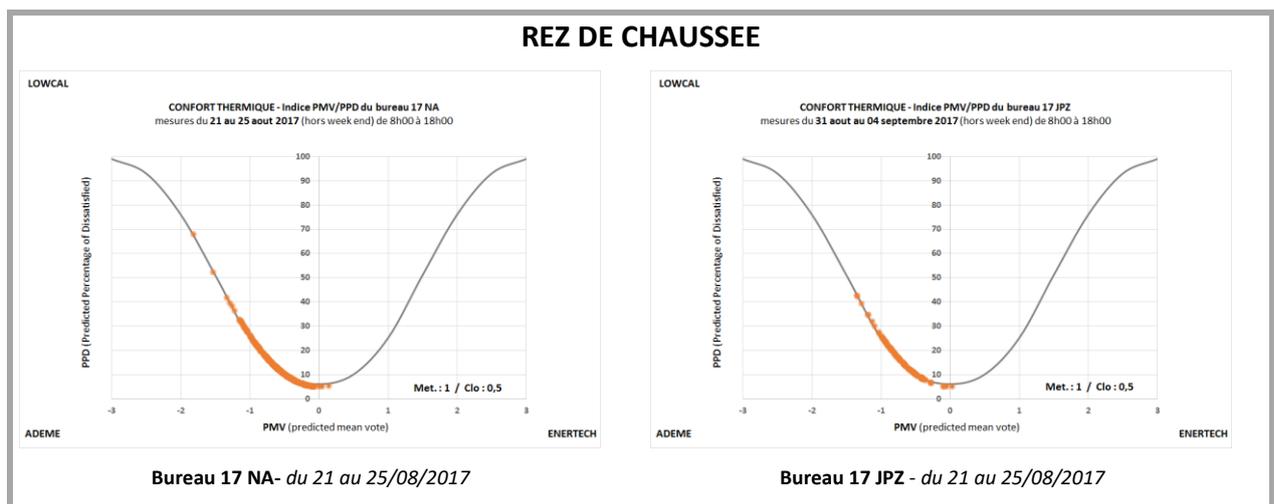


Figure 18 : Influence du paramètre «Clo.» (tenue vestimentaire) sur le confort thermique – données bibliographiques.

Les figures 17 et 18 présentent l’ensemble des points PMV-PPD mesurés au pas de temps de 10 minutes sur l’ensemble des postes.



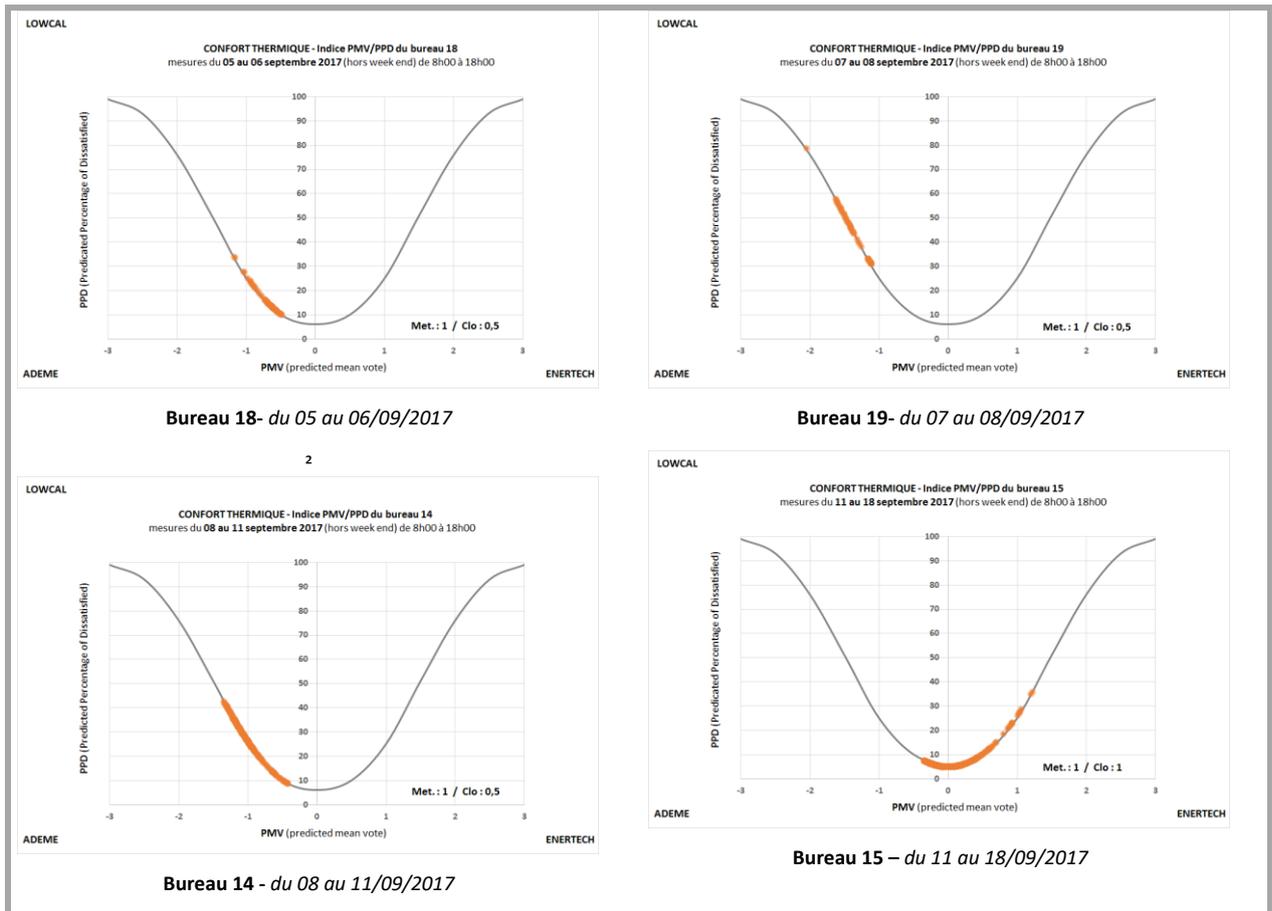
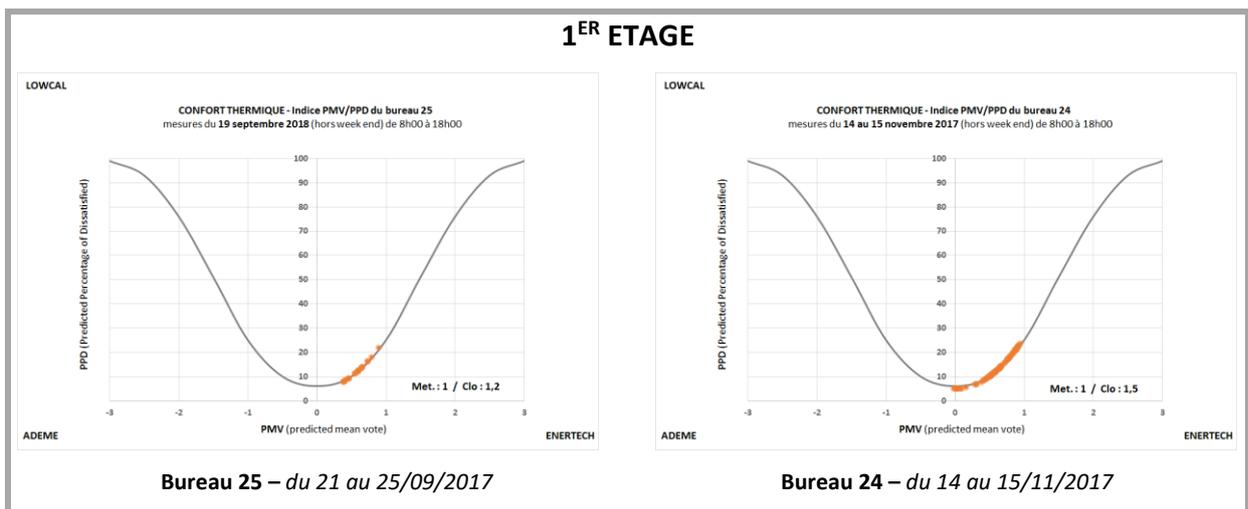


Figure 19 : Indices PMV-PPD des bureaux du RDC couvrant la période du 21/08/2017 au 18/09/2017.



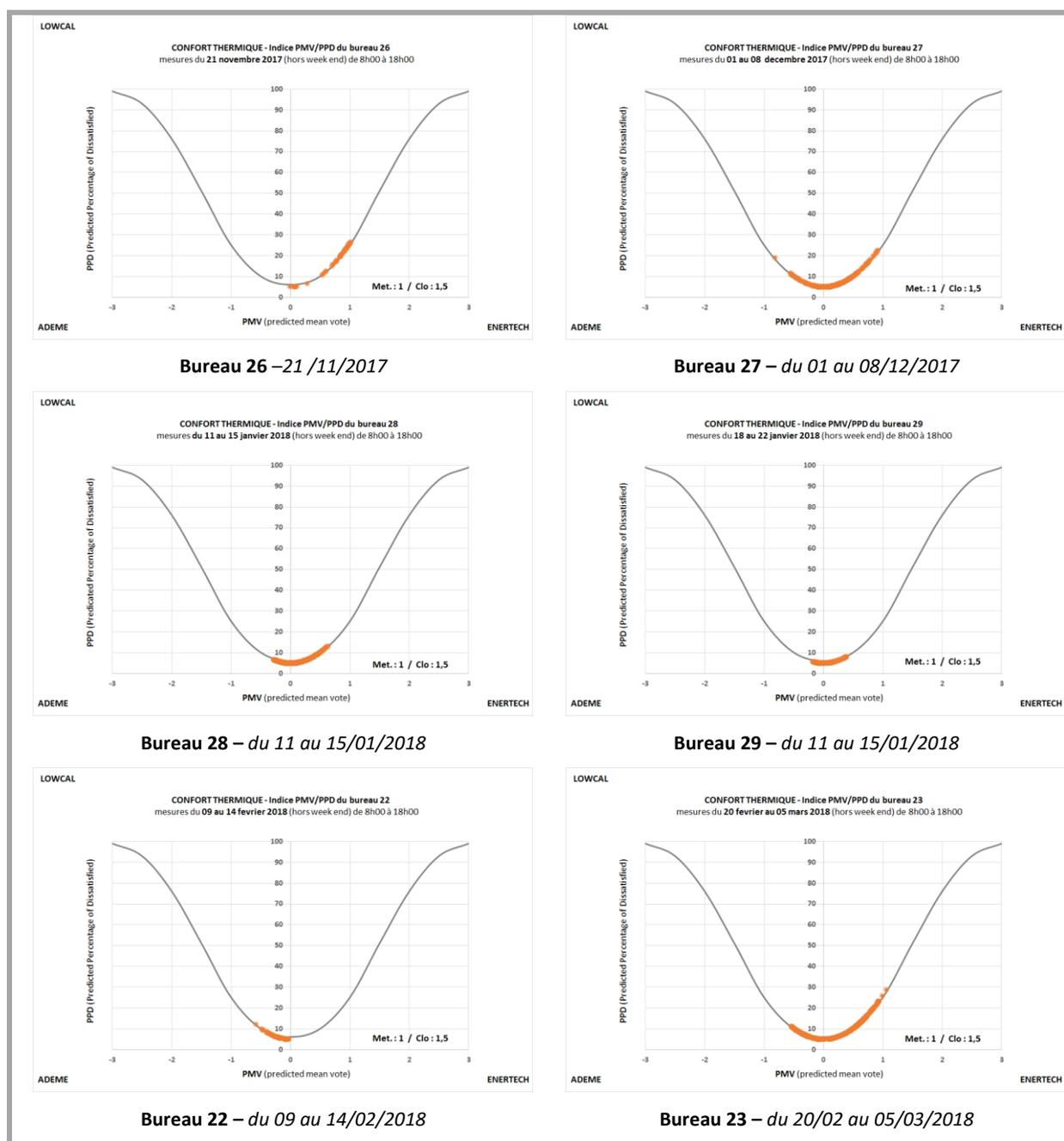


Figure 20 : Indices PMV-PPD des bureaux du R+1 couvrant la période du 21/09/2017 au 05/03/2018.

3.4 Confort d'été

La période « estivale » sélectionnée pour l'étude du confort d'été hygrothermique se déroule du 15/06/2017 au 15/09/2017 puis du 15/06 au 15/09/2018. **La température moyenne ambiante sur cette période dans le bâtiment LowCal est de 24,8°C.**

La chaleur maximale atteinte dans les locaux reste très raisonnable :

- Le jour le plus chaud : mercredi 08/08/2018 avec une moyenne journalière ambiante de 28,5°C ;
- La semaine la plus chaude : entre le 30/07/2018 au 05/08/2018 avec une moyenne hebdomadaire ambiante de 26°C ;

Ces températures mesurées montrent de façon incontestable qu’une isolation renforcée alliée à une bonne pratique des occultations et des ouvrants permet d’atteindre un degré de confort justifiant pleinement l’absence de climatisation.

3.4.1 Evolution des températures sur l’été 2017

La Figure 21 illustre l’évolution des températures intérieures de l’air et de la masse (sonde insérée dans un mur nord de brique de terre crue) et de la température extérieure entre le 15/06/2017 et le 15/09/2017.

On notera les faibles variations de la température de la masse (amortissement de l’ordre de +/-3°C) avec une moyenne de 23,6°C sur l’été 2017. On visualise sur ces données l’intérêt de maximiser l’inertie accessible pour limiter les pics de températures ambiantes durant les épisodes de forte chaleur.

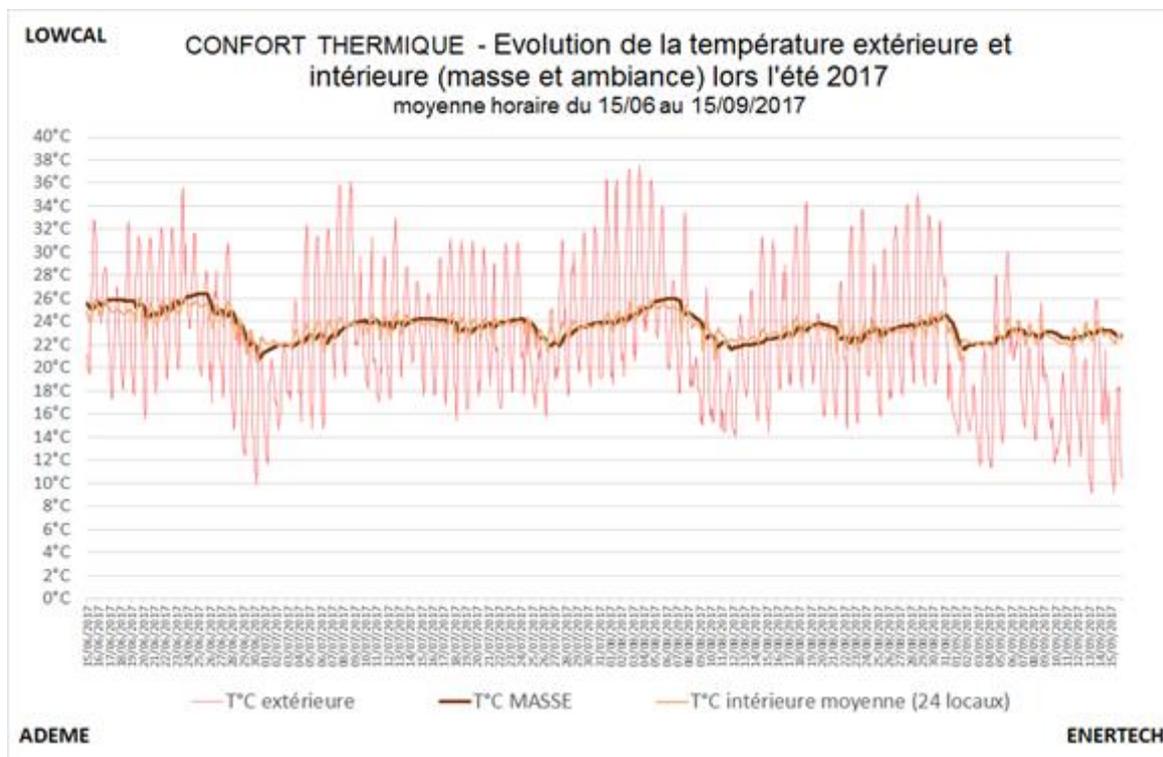


Figure 21: Evolution des températures extérieures et intérieures (ambiance et masse du bâti).

3.4.2 Evolution de la température sur la semaine la plus chaude

La Figure 22 illustre l’évolution des températures intérieure moyenne et extérieure de l’air lors de la semaine la plus chaude (semaine du 30/07/2018 au 05/08/2018).

On notera que lors de cette semaine, la température intérieure moyenne n’a pas dépassé 27,1°C.

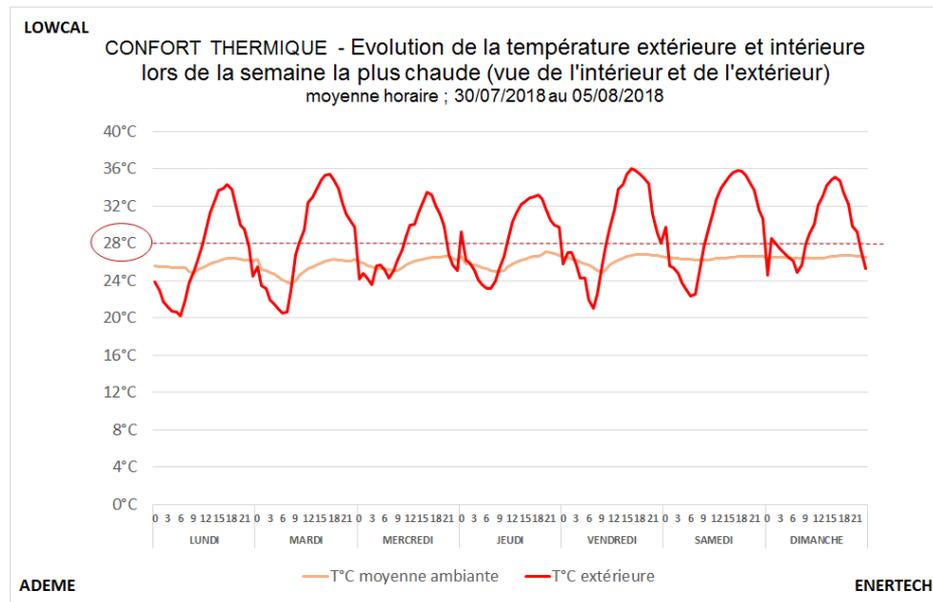


Figure 22 : Evolution des températures extérieure et intérieure moyennes.

3.4.3 Courbes de fréquences cumulées en période d'occupation

La Figure 23 montre que la température ambiante en été et en période d'occupation (8h-18h du lundi au vendredi, hors vacances et jours fériés) a oscillé entre 20,6°C et 27,1°C avec une moyenne de 23,8°C. On note donc ici que la température ambiante moyenne n'a jamais excédé 28°C, malgré des températures extérieures qui ont atteint jusqu'à 38°C (Cf. Figure 21).

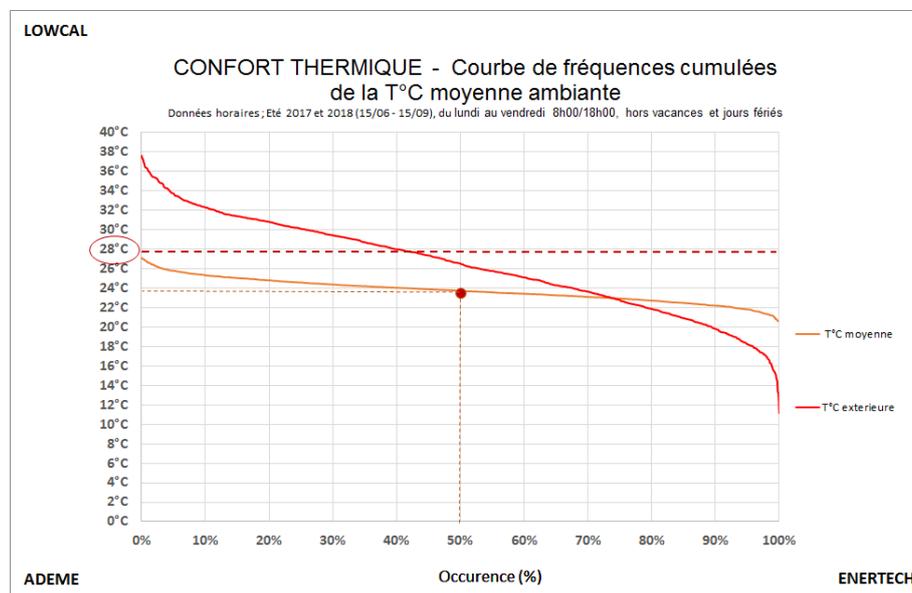


Figure 23 : Courbe de fréquences cumulées des températures intérieure moyenne et extérieure.

La Figure 24 présente l'ensemble des courbes de fréquences cumulées des températures ambiantes mesurées dans le bâtiment durant les étés 2017 et 2018. On constate que les températures maximales sont plus hétérogènes que les températures minimales.

L'écart en « température haute » ($\approx 4^\circ\text{C}$) est lié aux différentes orientations des bureaux et à l'ensoleillement. Par ailleurs les bureaux du R+1, ne bénéficiant pas de l'inertie de la dalle béton du RdC, sont globalement plus chauds que les bureaux du RdC.

L'écart en « température basse » ($\approx 1,5^{\circ}\text{C}$) est plus resserré car il concerne des périodes où la température extérieure est plus clémente, la masse plus homogène et les apports solaires moins critiques.

Le sas d'accueil et le local VDI se différencient par des températures élevées, l'un étant un local tampon de 5 m² orienté Sud, l'autre étant non occupé et équipé des serveurs et onduleurs photovoltaïques, avec des apports internes électriques notables.

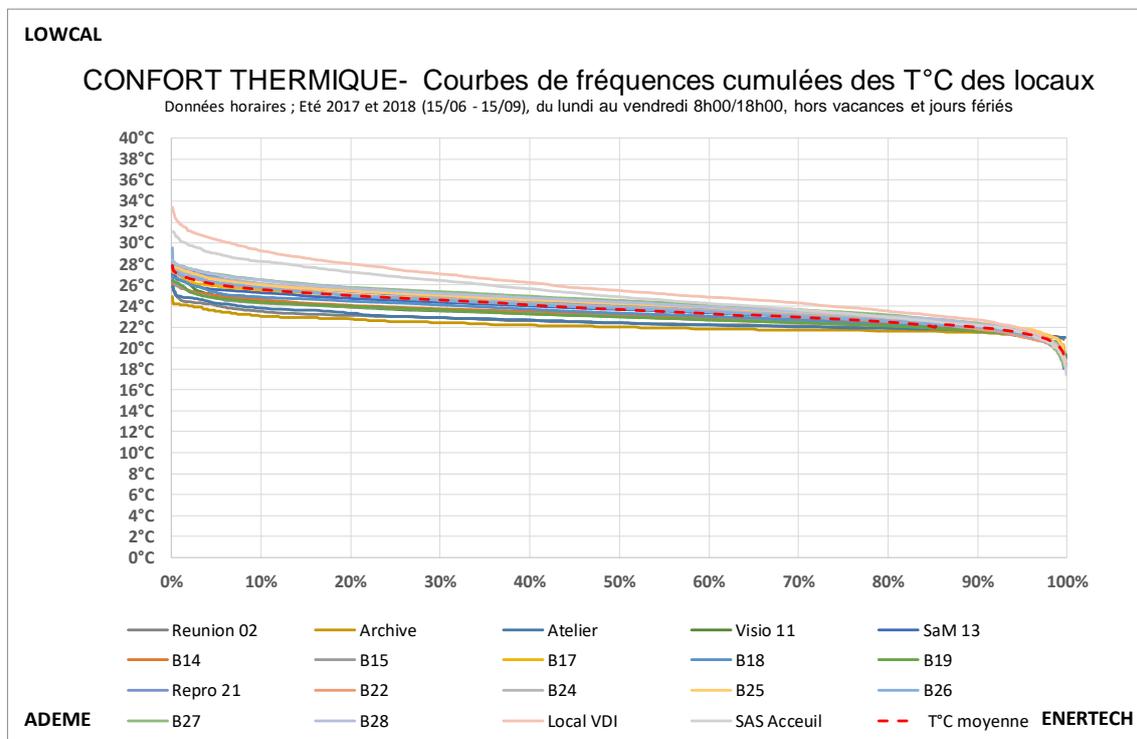


Figure 24 : Courbes de fréquences cumulées des températures ambiantes estivales.

3.4.4 Températures moyennes par locaux

La Figure 25 présente la température ambiante moyenne et maximale horaire pour chaque local. On notera que les 2 seuls locaux qui présentent un nombre d'heures significatif au-dessus de 28°C ne sont pas des locaux occupés :

- le local VDI pour lequel les apports internes sont très importants : local non occupé où sont installés les équipements de serveurs informatiques et les onduleurs de la centrale de production photovoltaïque.
- le sas de l'accueil. Ce local est non occupé, il sert de local tampon, est fermé et très largement vitré plein Sud, avec notamment une porte vitrée dont l'occultation est un volet amovible en bois (anti-effraction) rarement mis en place en dehors des périodes de canicule.

On constate assez nettement sur ce graphique que les bureaux les plus chauds se trouvent à l'étage tandis que les locaux les plus frais sont situés au rez-de-jardin (locaux semi-enterrés avec parois en béton).

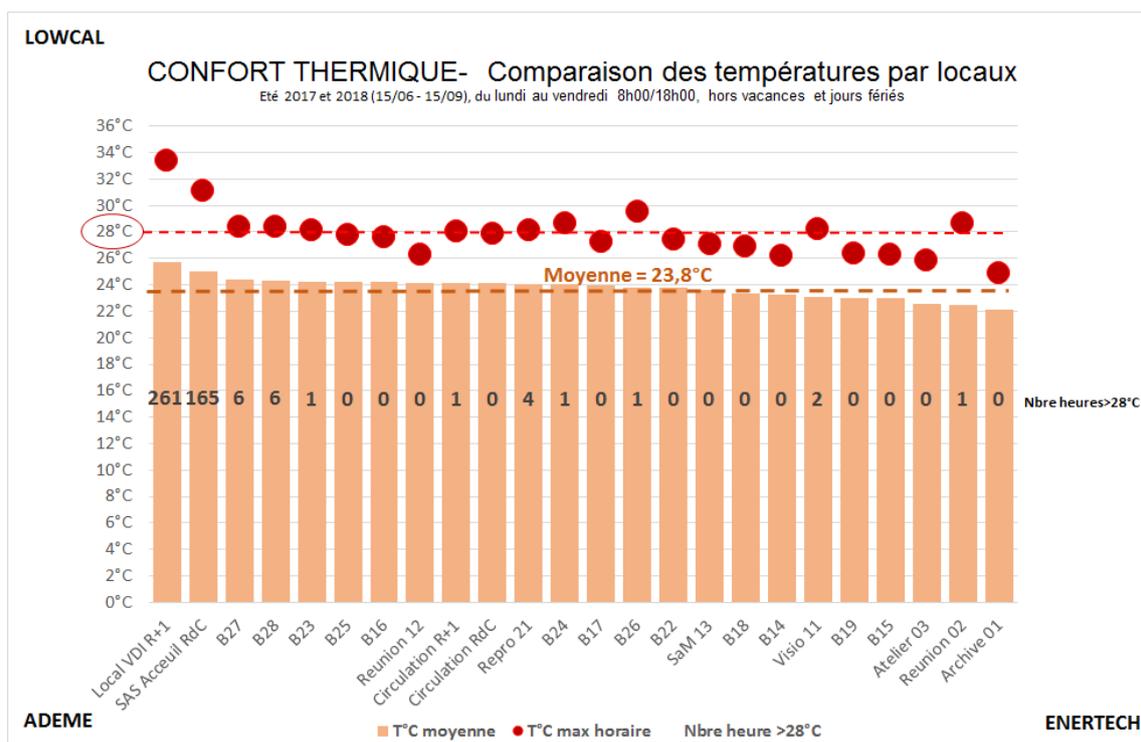


Figure 25 : Histogramme de la température moyenne horaire intérieure de chaque local en période d’occupation.

3.4.5 Implication des occupants

Il est communément admis que « plus un bâtiment est passif, plus les occupants doivent être actifs ». L’implication des occupants est en effet essentielle au maintien d’un niveau de confort estival satisfaisant dans un bâtiment non climatisé.

Même si les occupants du LowCal sont – de par leur profession et leurs convictions - des personnes très impliquées dans les questions de confort thermique, de ventilation nocturne et de gestion des apports solaires, un « livret d’accueil » a été rédigé. Il permet, de par ses rappels réguliers, de s’assurer de la cohérence et de la pérennité des bonnes pratiques (la Figure 26 en montre un extrait).

3.3 - Consignes spécifiques pour l’été

Aucun objet ne doit empêcher l’ouverture des fenêtres (mis à part les cales de blocages).

À cette saison, il s’agit de minimiser l’entrée de la chaleur en journée et maximiser le rafraîchissement des masses la nuit et le matin. Cela oblige à distinguer plusieurs périodes.

Le premier arrivé ouvre en grand l’ensemble des fenêtres pour profiter de la fraîcheur matinale tout en laissant fermés les volets à l’est.

Dès que le soleil atteint la façade sud, les brise-soleils devront être ajustés pour empêcher l’entrée du rayonnement.

...

Dans l’idéal, dès que la température extérieure dépasse la température de la masse, les fenêtres doivent être fermées pour passer en ventilation mécanique. En pratique, comme il est impossible d’être précis, on peut adopter une période de transition où, lorsque la température extérieure n’est pas trop éloignée de la température intérieure, les fenêtres sont moins ouvertes c’est-à-dire fermées dans les locaux inoccupés et en position oscillante dès les locaux occupés. Au cœur de l’été, le moment où la température extérieure dépasse la température intérieure se situe généralement en 9 h et 12 h. Penser à vérifier si la stratégie est adaptée, y compris dans les locaux communs, à la pause de milieu de matinée !

En inoccupation nuit uniquement, tous les volets doivent être complètement fermés, sauf ceux du local repro et du bureau 29 qui restent ouverts. Les brise-soleils doivent être complètement fermés pour les baies accessibles de l’extérieur et en position complètement descendu et lames à 45° pour l’étage et le bureau 17. Toutes les fenêtres doivent être en position oscillante, à l’exception des petites fenêtres de l’étage (est, ouest et local onduleur) et du bureau 18 qui doivent être grande ouvertes et calées. Les portes intérieures doivent être ouvertes pour favoriser le caractère traversant de la sur-ventilation, y compris celle du local onduleur. La fermeture de chaque occultation externe doit être faite au fur et à mesure des départs (typiquement le dernier qui quitte son bureau). Par contre, dans l’idéal, l’ouverture des fenêtres est effectuée par les derniers à quitter le bâtiment (ou leur étage). Ne pas hésiter à se coordonner.

En inoccupation week-end, tous les volets et brise-soleils doivent être complètement fermés, y compris la porte d’entrée. L’ensemble des fenêtres doivent être fermées à l’exception de celles du local onduleur qui doivent rester ouvertes pour dissiper la chaleur émise par ce dernier. Par contre, la porte de ce local doit être fermée. Éventuellement, les fenêtres peuvent être ouvertes le dimanche soir, si quelqu’un passe par là...

Figure 26 : Consignes spécifiques pour le confort d’été ; Livret d’accueil du LowCal.

La photo de la Figure 27 présente la façade sud du bâtiment avec ses brise-soleils orientables (BSO) permettant de se prémunir du rayonnement direct tout en bénéficiant d’éclairage naturel. La porte d’entrée donnant sur le SAS de l’accueil dispose d’une occultation amovible anti-effraction, en bois, qui est laissée en place en journée en période de canicule.



Figure 27 : Façade sud du bâtiment.

La Figure 28 illustre sur une semaine type les effets de la surventilation naturelle matinale (réalisée par ouverture des fenêtres) sur la température intérieure, dans le bureau 26. On notera un pic de température de +3°C lié à l’ouverture d’une fenêtre en fin d’après-midi, ce qui montre l’importance (évidente) de maintenir les fenêtres fermées quand la température extérieure dépasse la température intérieure.

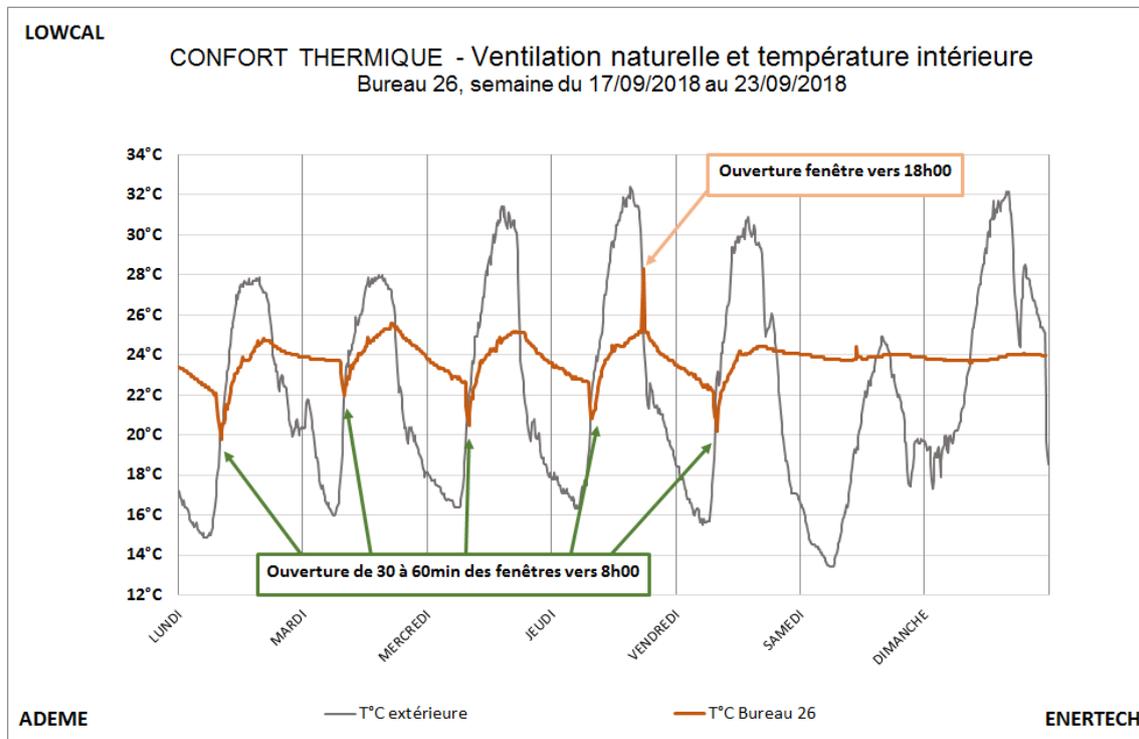


Figure 28: Influence de la surventilation matinale sur la température intérieure.

3.4.6 Polygones de confort (ASHRAE & COSTIC)

Présentation de la méthode

Le polygone de confort proposé par la norme « Standard 55 » de l’ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineer ; Addendum to Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*) fait référence aux combinaisons de température opérative³ et d’humidité que l’on estime correspondre à un environnement thermique acceptable. Différentes zones de confort sont définies en fonction de la vitesse de l’air, de l’activité de la personne (taux métabolique (met.) et de l’habillement de celle-ci (résistance thermique (clo.)).

On notera que pour des bâtiments non climatisés, une autre méthode d’évaluation est proposée (Cf. annotation en haut à gauche de la Figure 29). Cette deuxième méthode est présentée au chapitre *Confort adaptatif selon la méthode ASHRAE standard 55*.

³ La température opérative est la résultante de la température de l’air et de la température des parois

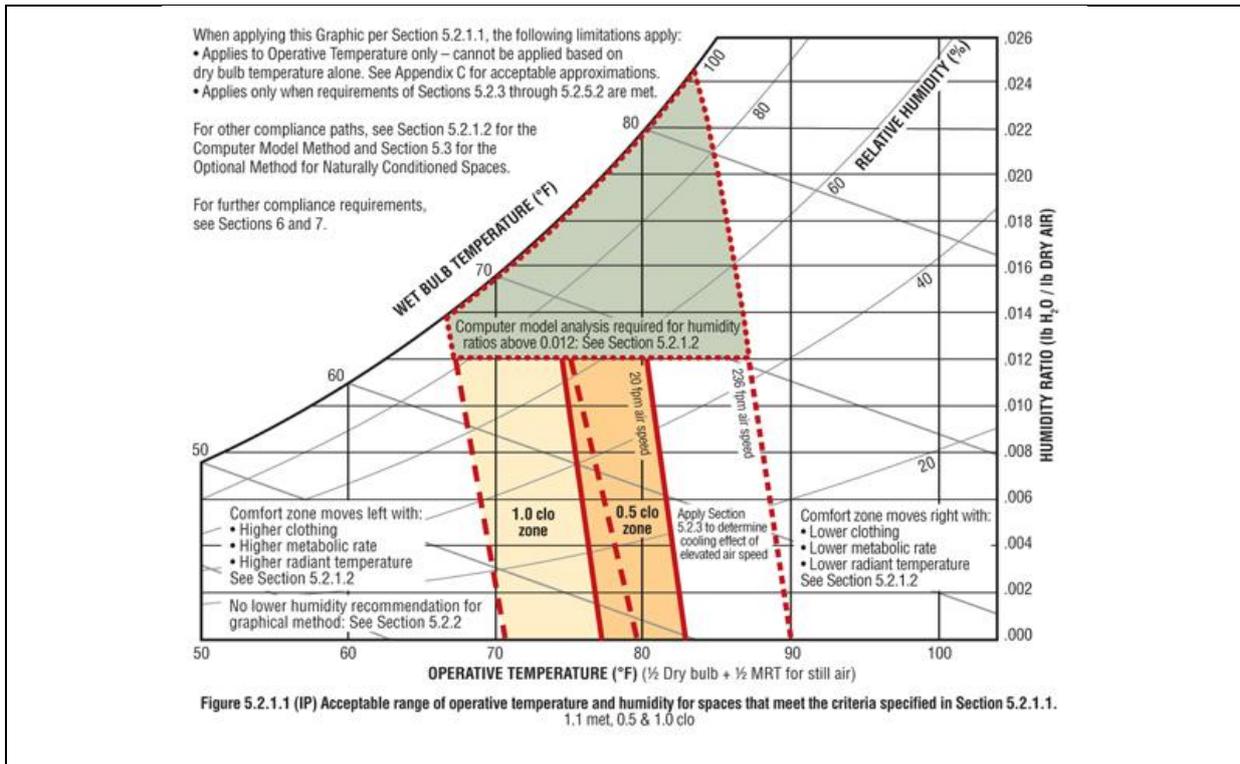


Figure 29 : ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

Paramètres de saisie – Vêtements			Paramètre de saisie - Activités		
Paramètre en clo	Paramètre en m2K/W	Explication	Paramètre en met	Paramètre en W/m2	Explication
0 – 0,02		Aucun vêtement	0,1 – 0,7	6 – 45	Couché, détendu
0,03 – 0,29	0,005 – 0,045	Sous-vêtements	0,8 – 0,9	46 – 57	Assis, détendu
0,30 – 0,49	0,046 – 0,077	Short et t-shirt	1,0 – 1,1	58 – 59	Activité assise
0,50 – 0,79	0,078 – 0,122	Pantalon et t-shirt	1,2 – 1,5	70 – 92	Debout
0,80 – 1,29	0,123 – 0,200	Costume léger	1,6 – 1,7	93 – 104	Debout, activité légère
1,30 – 1,79	0,201 – 0,277	Costume chaud	1,8 – 1,9	105 – 115	Debout, activité modérée
1,80 – 2,29	0,278 – 0,355	Veste ou manteau	2,0 – 2,3	116 – 139	Marche lente
2,30 – 2,79	0,356 – 0,432	Vêtements d'hiver chaud	2,4 – 2,9	140 – 174	Marche rapide
2,80 – 3,00	0,433 – 0,465	Vêtements d'hiver très chaud	3,0 – 3,4	175 – 203	Activité intense

Correspondance Clo. et Met.(Notice TESTO 480 p.49)

Les températures intérieures en abscisse de ce polygone de confort sont des **températures opératives**. Comme indiqué sur la Figure 29, la température opérative est égale à la moyenne de la température ambiante et la température radiative moyenne (lorsque la vitesse d’air est inférieure à 20 m/s).

Or, la mesure de la température radiative moyenne, régie par la norme ISO 7726 « Ambiances thermiques - Appareils et méthodes de mesures des grandeurs physiques », doit être effectuée par une « boule noire » WBGT (Wet Bulb Globe Température) qui est un capteur onéreux.

La méthode ASHRAE propose sous certaines conditions de considérer la température opérative égale à la température de l’air (Cf. Figure 30). Ces 4 conditions sont remplies simultanément à LowCal :

- Condition 1 ✓ : pas de panneau rayonnant chauffant et/ou rafraichissant.

- Condition 2 ✓ : $[U_{mur\&fen\hat{e}tre} < \frac{50}{T^{\circ}C \text{ de base int.} - T^{\circ}C \text{ base ext.}}]$ soit $U_{mur\&fen\hat{e}tre} < 1,9$ W/m².K à Pont-de-Barret. Cette valeur se situe autour de 0,3W/m².K sur LowCal.
- Condition 3 ✓ : Facteur solaire g < 0,48. Si on considère, sur les menuiseries du LowCal, un facteur solaire g_{glass} de 0,6 et un ratio de clair de 70 %, le facteur solaire g est de 0,42 (sans tenir compte des BSO).
- Condition 4 ✓ : Pas de système de chauffage majeur dans les espaces étudiés.

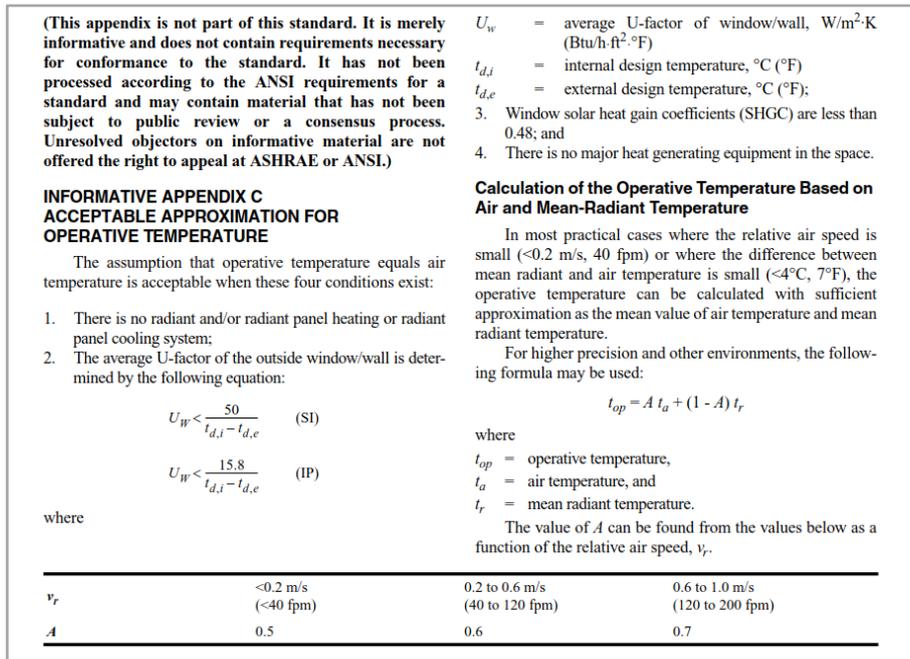


Figure 30 : ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.

Présentation de la méthode COSTIC

Le COSTIC propose également un polygone de confort avec un champ hygrothermique significativement différent de celui de l’ASHRAE (Cf Figure 31 Zone 4).

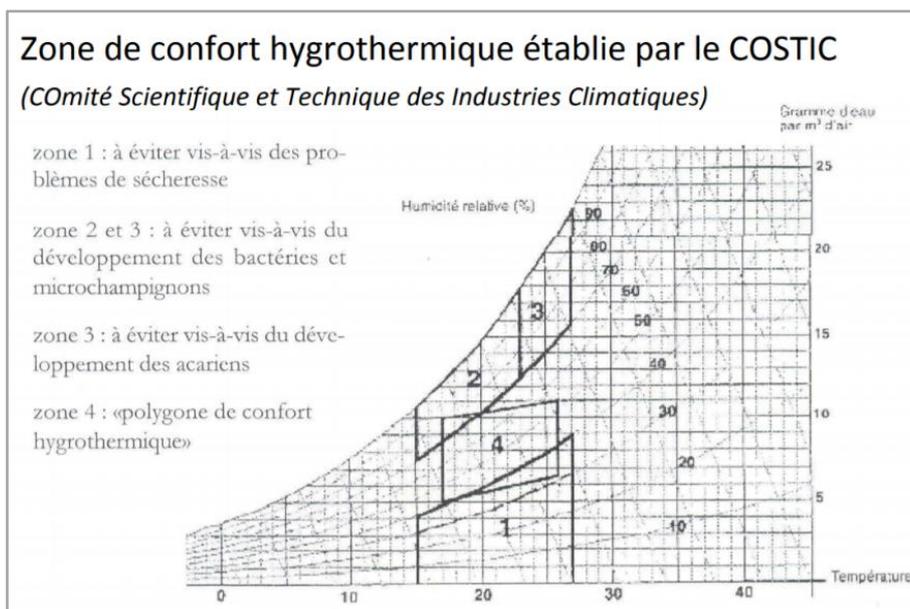


Figure 31 : Zone de confort hygrothermique établi par le COSTIC

Polygones de confort ASHRAE et COSTIC

La Figure 32 montre la projection de l’ambiance moyenne mesurée à LowCal dans le diagramme hygrothermique. On constate que le nombre de points sortant du polygone COSTIC est important (62% de dépassement) tandis que le nombre de points sortant du polygone ASHRAE l’est sensiblement moins (30%).

Ces dépassements ne sont pas liés à la température sèche intérieure mais à l’humidité, comme on peut le constater sur le diagramme. Or nous verrons plus loin que les valeurs élevées d’humidité intérieure sont essentiellement dues à des valeurs élevées de l’humidité extérieure, un bâtiment non climatisé ne pouvant pas assécher l’air contrairement à un bâtiment climatisé.

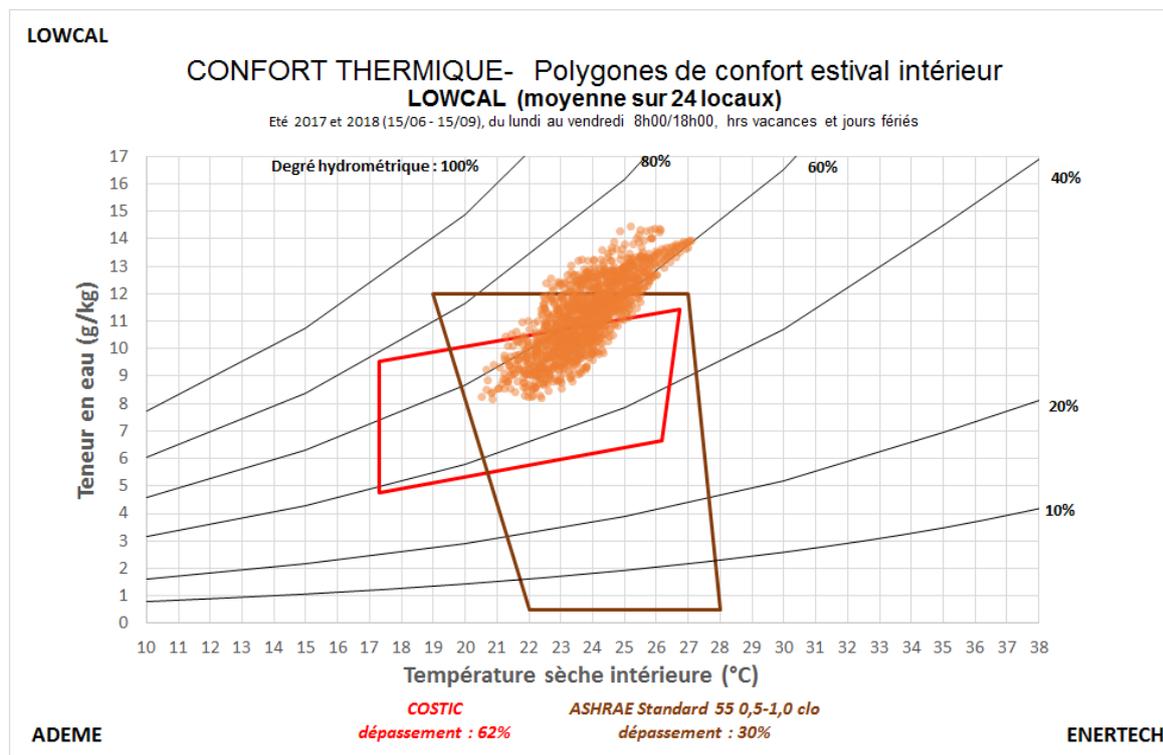


Figure 32 : Polygones de confort ASHRAE et COSTIC et ambiance estivale moyenne mesurée à LowCal.

Points hors polygones ASHRAE

Les figures 31 et 32 illustrent la répartition des points hors polygone ASHRAE, respectivement par type de jour de la semaine, puis par tranche horaire. On constate que ces points hors polygone sont indépendants, d’une part, du jour de la semaine et, d’autre part, d’une tranche horaire spécifique.

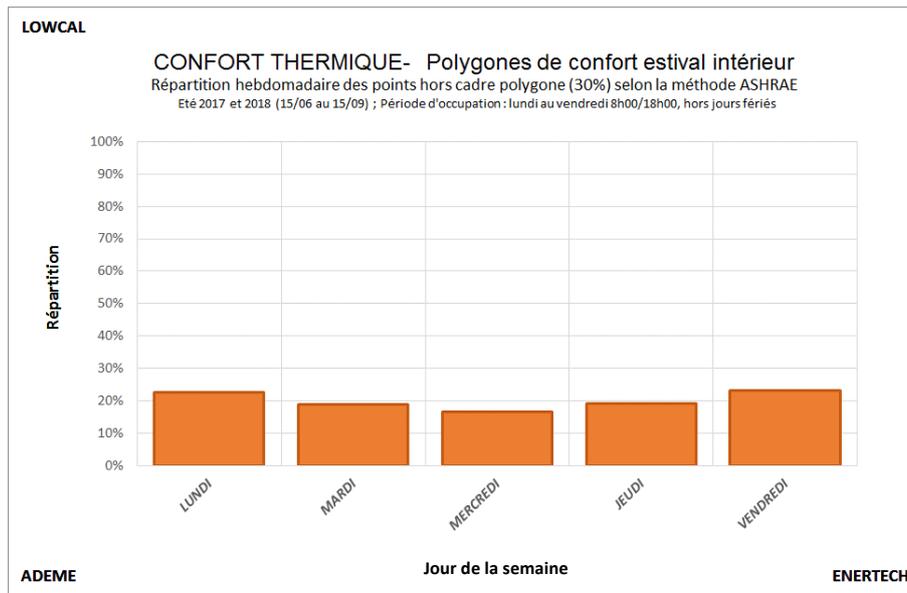


Figure 33 : Répartition par jours ouvrés des points hors polygone ASHRAE.

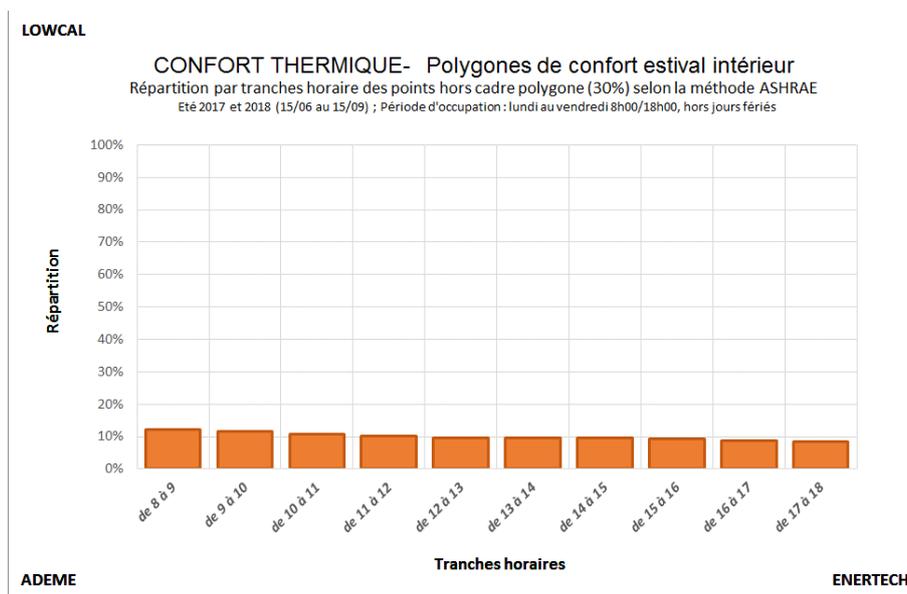


Figure 34 : Répartition par tranches horaires des points hors polygone ASHRAE.

Teneur en eau intérieure (humidité absolue)

La Figure 35 illustre l'évolution de la teneur en eau intérieure du bâtiment par rapport à l'extérieur, sur une période de deux années.

Nous pouvons constater qu'en été, la teneur en eau intérieure suit globalement l'évolution de l'air extérieur, avec des pics ($>11 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{airsec}}$) qui induisent les points hors polygone de confort ASHRAE.

Concernant les périodes hivernales, il est intéressant de constater une teneur en eau intérieure du bâtiment plus stable autour de $8 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{airsec}}$ et significativement supérieure à la teneur en eau extérieure. Ce phénomène est imputable au phénomène de désorption des murs en briques de terre crue ainsi qu'aux échangeurs enthalpiques des caissons de

ventilation décentralisée qui restituent (volontairement) au bâtiment, une partie de l’humidité émise par les occupants.

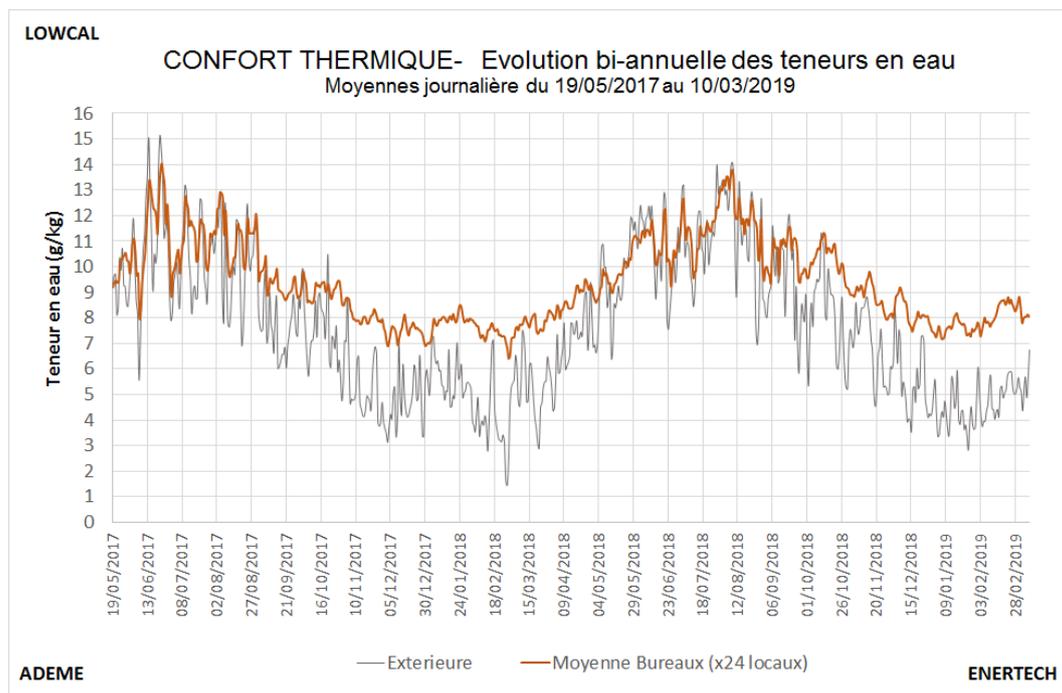


Figure 35 : Evolution biannuelle des teneurs en eau de l’air intérieur et de l’air extérieur.

La Figure 36 montre une certaine homogénéité des teneurs en eau entre les différents locaux, avec une valeur médiane de $11,2 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{airsec}}$ sur la période estivale, aux heures d’occupation. L’atelier et le local archives, semi-enterrés, ont une humidité absolue plus stable que la moyenne, ne descendant pas en dessous de $10 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{airsec}}$ sur la même période.

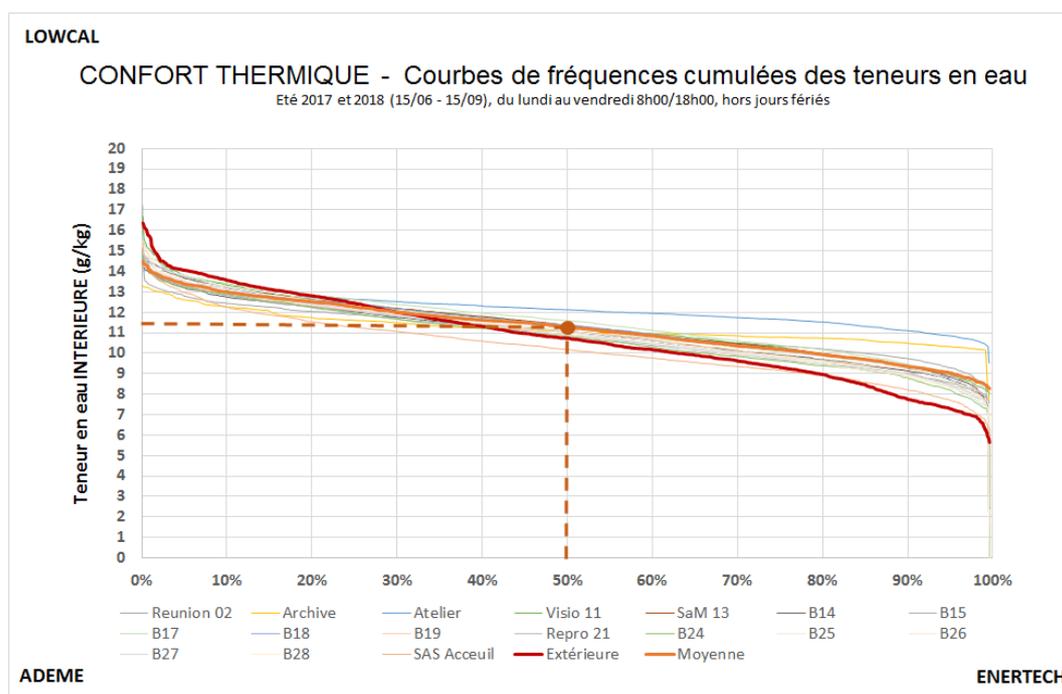


Figure 36 : Courbes de fréquences cumulées des teneurs en eau des différents locaux en période estivale.

Teneurs en eau de l’air intérieur et de l’air extérieur

Sans système de déshumidification ou de rafraîchissement/climatisation, la teneur en eau intérieure d’un bâtiment ne peut pas, théoriquement, être inférieure à celle de l’extérieur. Au mieux, un bâtiment peut écrêter les fluctuations par le biais de l’inertie hydrique de ses parois et de ses autres constituants.

La Figure 37 montre que, sur la période estivale, la teneur en eau de l’air intérieur du bâtiment est supérieure à celle de l’extérieur pendant environ 60% du temps.

On notera que lorsque la teneur en eau extérieure est la plus importante (entre 13 et 16 $\text{g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{airsec}}$), la teneur en eau intérieure est inférieure à cette dernière. Ce phénomène est imputable aux murs de briques de terre crue et à leur pouvoir de sorption estival (désorption en hiver).

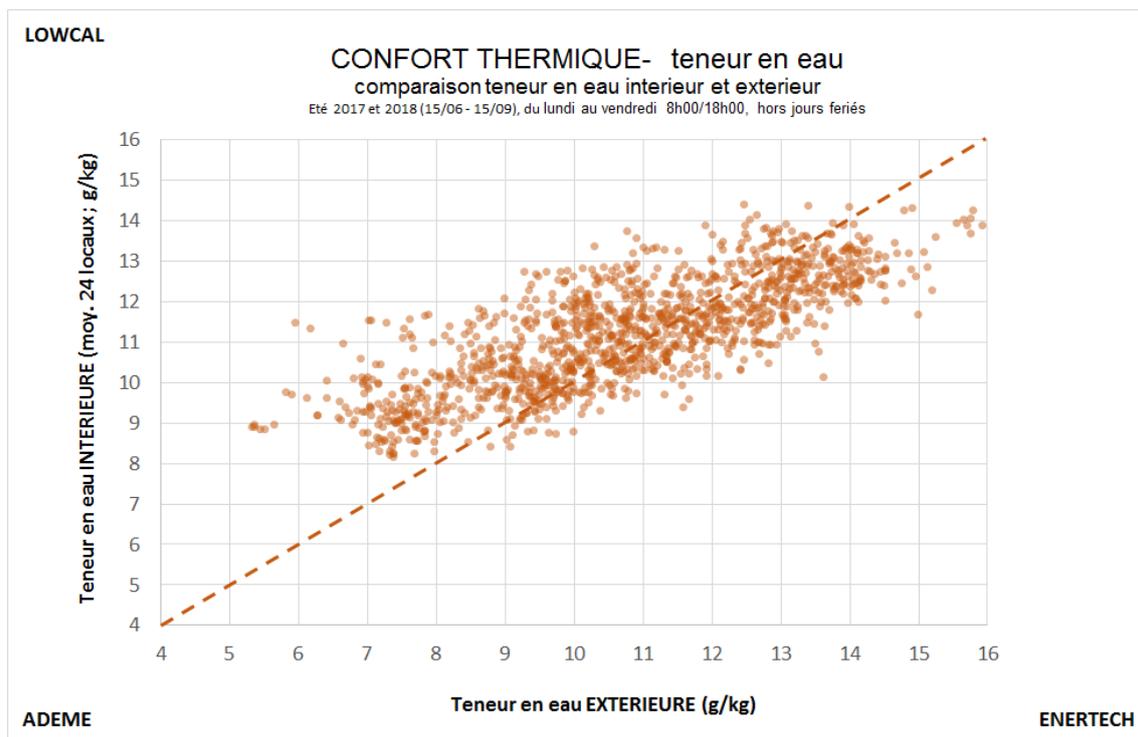


Figure 37 : Comparaison des teneurs en eau intérieure et extérieure

La Figure 38 présente les polygones de confort avec projection de la température intérieure sèche du bâtiment, associée à la teneur en eau extérieure. Il est intéressant de voir que le nombre de points hors cadre ASHRAE est le même qu’avec la teneur en intérieure (30% de dépassement). Ceci nous permet de conclure en première approximation que les points inconfortables sont une conséquence directe de l’humidité extérieure.

Le bâtiment étant déjà composé en grande partie de bois et de terre crue, le seul moyen de réduire l’humidité absolue serait de remplacer les échangeurs enthalpiques des ventilations (qui restituent en partie l’humidité intérieure quand elle est supérieure à l’humidité extérieure) par des échangeurs standards⁴, ou de rafraîchir le bâtiment mécaniquement ce qui aurait un coût énergétique élevé et a été exclu à la conception.

⁴ Les échangeurs enthalpiques sont néanmoins utiles en hiver pour éviter d’avoir un air intérieur trop sec, voir ci-après.

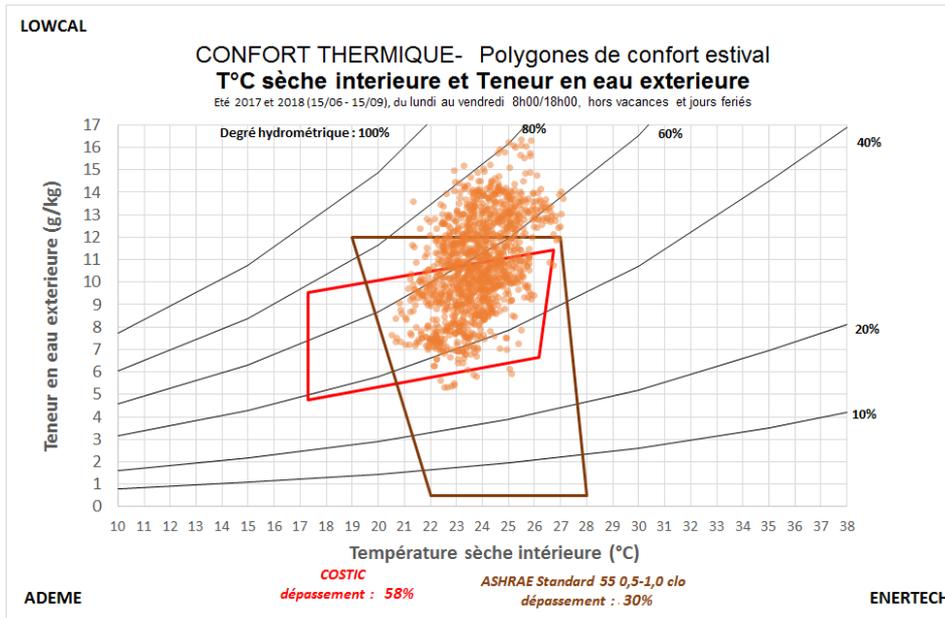


Figure 38 : Température intérieure associée à la teneur en eau extérieure.

Echangeur enthalpique

Les échangeurs des caissons de ventilation double-flux décentralisée de LowCal sont des échangeurs ERV (Enthalpy Recovery Ventilation) permettant une récupération de chaleur et d’humidité par porosité hydrique de l’échangeur.

Avec un échangeur classique HRV (Heat Recovery Ventilation), le renouvellement d’air des locaux créerait un assèchement de ces derniers plus important en hiver, et, dans une moindre mesure, une augmentation d’humidité⁵ en été (Cf. Figure 39)

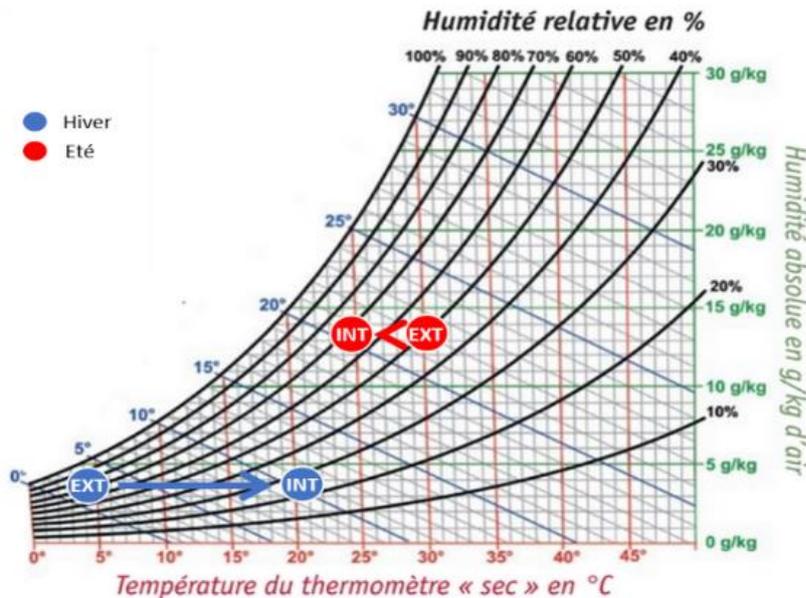


Figure 39 : Diagramme psychrométrique et saisonnalité des ambiances intérieures/extérieures.

⁵ Cependant, nous avons vu plus haut que la teneur en eau intérieure du bâtiment dépasse parfois la teneur extérieure. Dans ce cas un échangeur classique apparaît plus avantageux qu’un échangeur enthalpique car il permet une meilleure évacuation de l’humidité.

Les figures 38 et 39, extraites d’un document de formation de ZEHNDER à destination de la Fédération Française de la Construction Passive, montrent pour des conditions identiques l’effet de l’échangeur enthalpique sur la teneur en eau de l’air soufflé par rapport à l’air neuf, puis par répercussion sur l’air extrait, en comparaison avec un échangeur « classique ».

A noter que cet exemple (8 jours) a été réalisé lors de conditions extérieures froides et sèches.

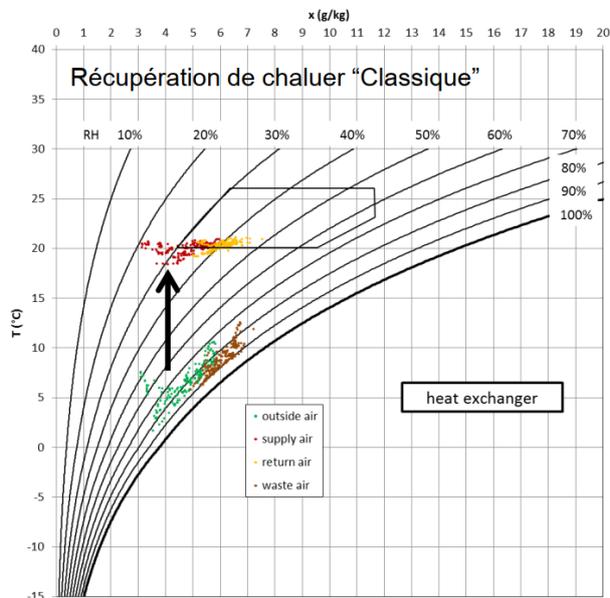


Figure 40 : Exemple de teneur en eau de l’air soufflé avec un HRV (Source ZEHNDER)

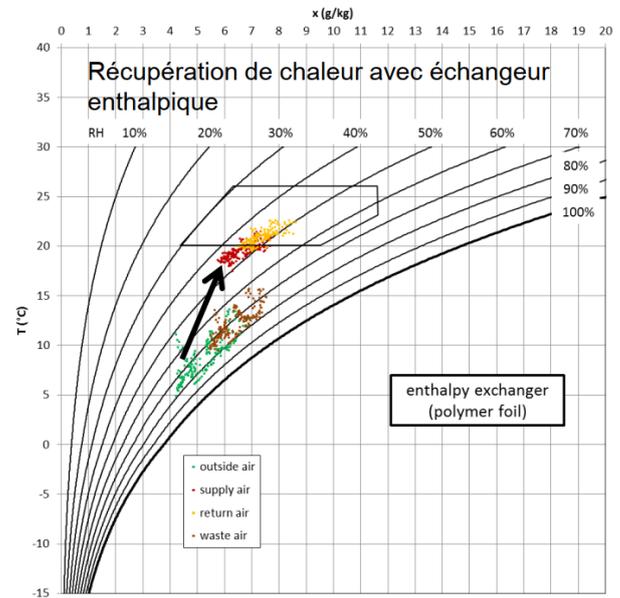


Figure 41 : Exemple de teneur en eau de l’air soufflé avec un ERV (Source ZEHNDER)

Les figures 40 et 41 présentent les courbes de fréquences cumulées, estivale et hivernale, des teneurs en eau de l’un des 5 caissons de ventilation LowCal ayant fait l’objet d’un monitoring avancé.

Les teneurs en eau de l’air aux bornes de l’échangeur sont présentées sur la période estivale puis sur la période hivernale, uniquement lorsque la ventilation est en fonctionnement.

La Figure 45 illustre bien les échanges d’humidité de l’*Air Extrait* vers l’*Air Neuf* lorsque la ventilation est en fonctionnement. Cet échange contribue fortement au confort hivernal.

L’échange est moins perceptible en été lorsque les teneurs en eau sont globalement plus équilibrées entre air intérieur et air extérieur (Cf. Figure 44).

Période estivale

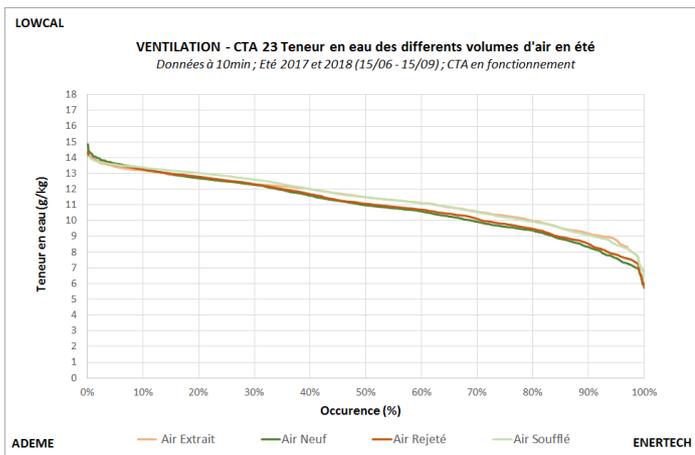


Figure 42 : Fréquences cumulées des teneurs en eau aux bornes de la CTA23 en été

Période hivernale

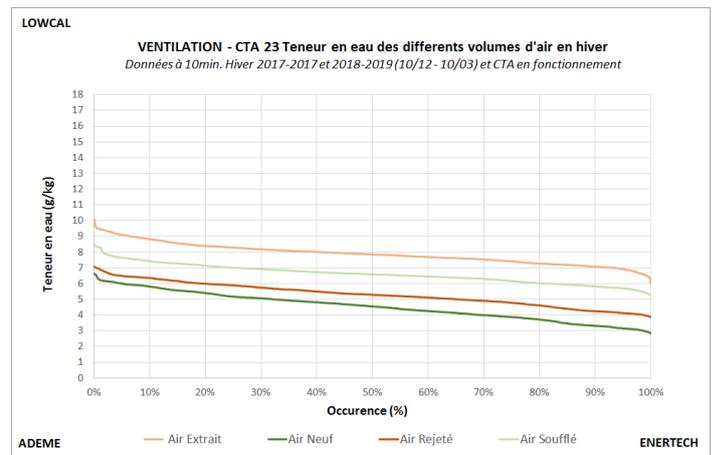


Figure 43 : Fréquences cumulées des teneurs en eau aux bornes de la CTA23 en hiver

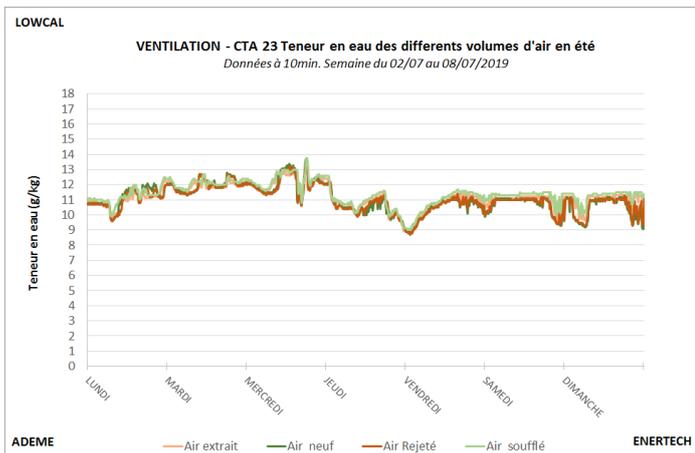


Figure 44 : Evolution des teneurs en eau aux bornes de la CTA23 d'une semaine type en été.

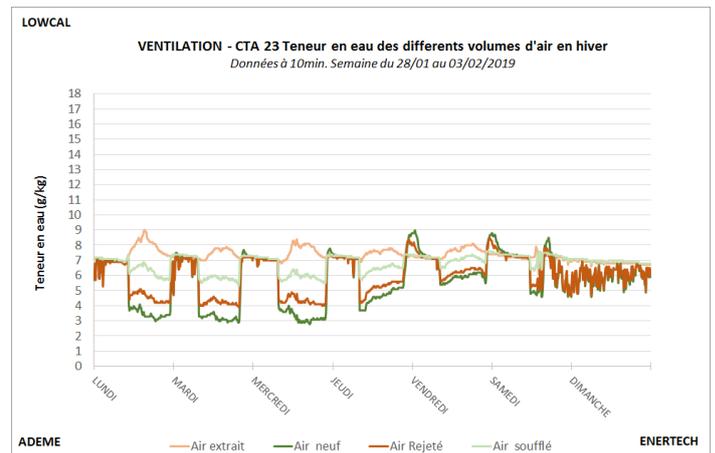


Figure 45 : Evolution des teneurs en eau aux bornes de la CTA23 d'une semaine type en hiver.

Pour plus de détails, se reporter à l'Annexe 3 : graphiques présentant les évolutions des températures ambiantes et CTA de 5 bureaux sur la période estivale.

3.4.7 Confort adaptatif selon la méthode ASHRAE standard 55

Présentation de la méthode

L'ASHRAE propose une méthode adaptative pour les espaces non climatisés et disposant d'ouvrants ajustables par les occupants. Cette méthode, contrairement au polygone de confort, prend en compte la température extérieure. Il s'agit en revanche d'une température extérieure moyennée au mois.

La température intérieure est, de la même manière que pour le polygone de confort, une température opérative (moyenne des températures sèche et radiative). Sous les conditions énumérées au §3.4.6, la température opérative peut être considérée égale à la température de l'air.

Selon ASHRAE, ce modèle adaptatif de confort thermique est dérivé d'une base de données mondiale de 21 000 mesures prises principalement dans des immeubles de bureaux. Le choix de mensualiser la température extérieure complexifie sensiblement la lecture du graphique ainsi que l’analyse des conditions extérieures générant des épisodes d’inconfort.

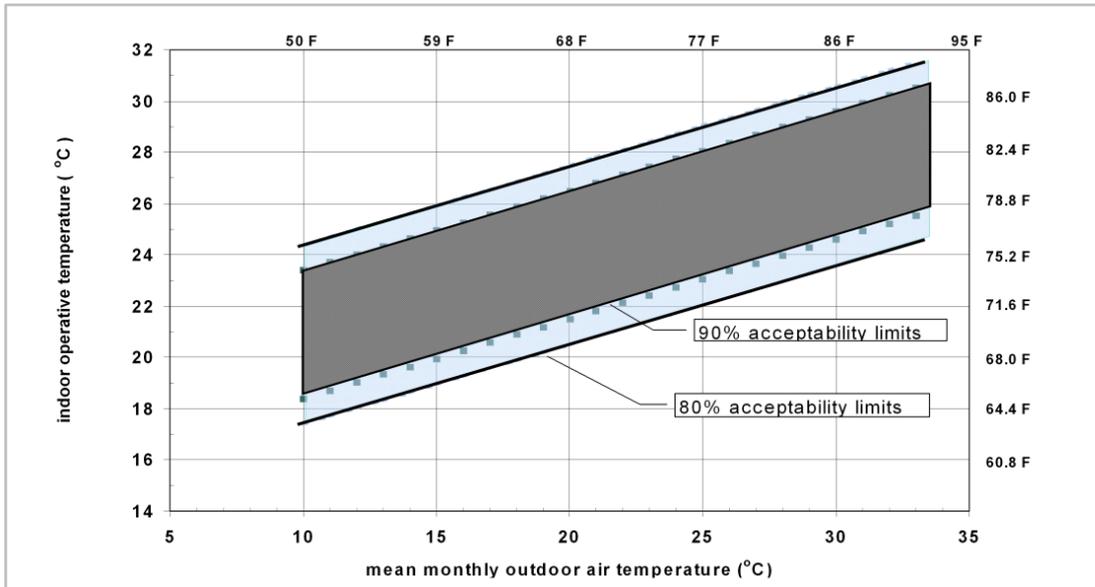


Figure 46: ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.

Résultats de mesure selon cette méthode

La Figure 47 analyse l’ambiance moyenne du bâtiment LowCal en été selon la méthode ASHRAE décrite ci-dessus. Le graphique montre que durant 11 % du temps la température moyenne n’apporte pas entière satisfaction (moins de 90 % de satisfaction) car elle serait trop froide, selon ce standard.

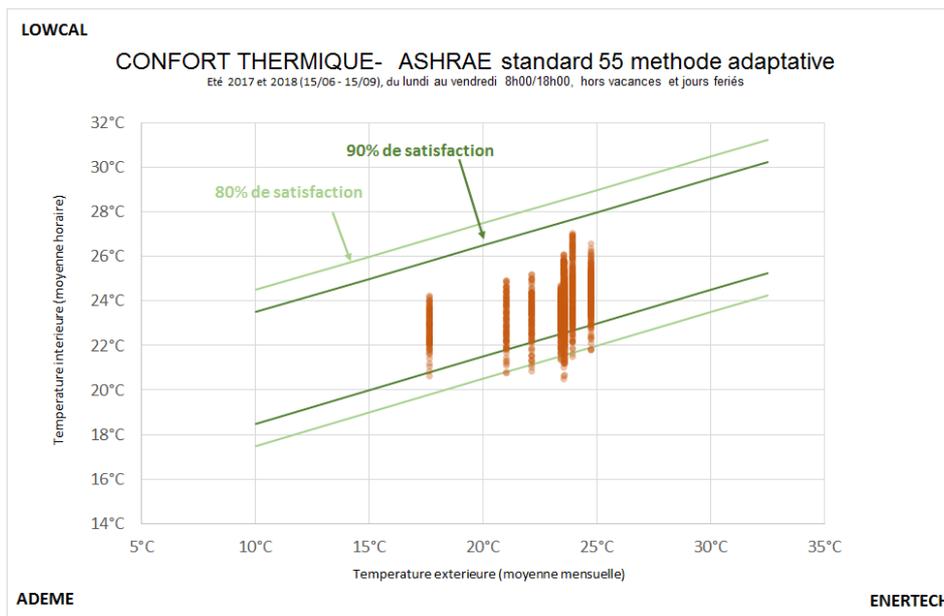


Figure 47 : Approche adaptative du confort estival selon l’ASHRAE (Standard 55).

La Figure 48 illustre la répartition des points en-dessous de la limite basse de 90% de satisfaction (représentant 11% du temps en occupation estivale) à l’échelle de la journée. On peut ainsi constater que la quasi-totalité de ces points ont eu lieu en début de matinée. Nous pouvons donc imputer cet inconfort à un rafraîchissement matinal volontaire par ouverture des fenêtres, pratiqué par les occupants (Cf. §3.4.5)

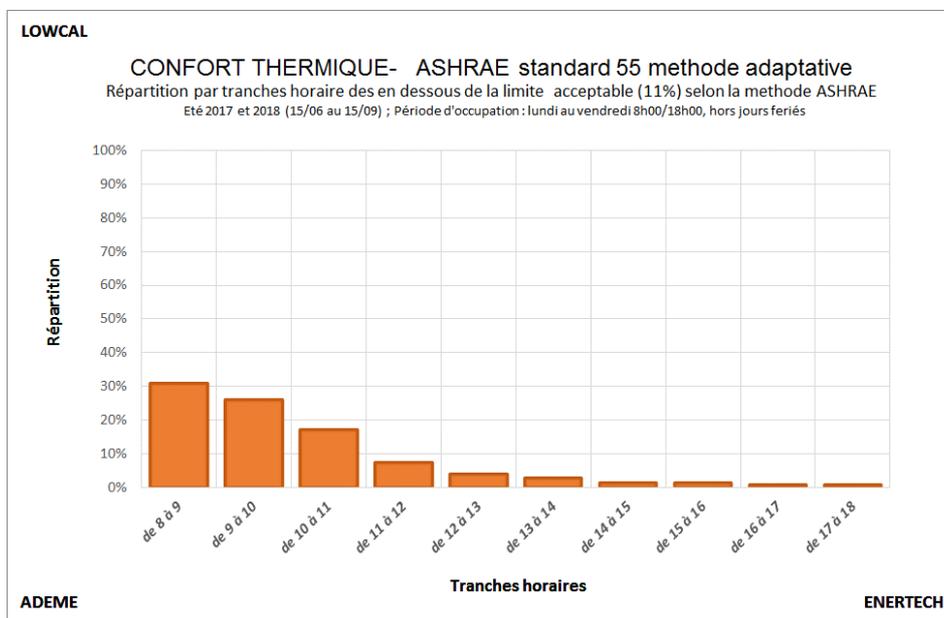


Figure 48 : Répartition par tranches horaires des points jugés inconfortables (trop froids) par la méthode ASHRAE standard 55.

3.4.8 Confort adaptatif selon la norme NF15251

Présentation de la norme

La norme NF EN 15251 définit des critères d’ambiance intérieure pour la conception et l’évaluation de la performance énergétique du bâtiment. C’est une approche globale qui associe la qualité de l’air intérieur, la thermique (confort adaptatif) et l’acoustique.

Concernant le confort thermique, cette norme prend en compte un confort *adaptatif* pour les bâtiments non climatisés avec possibilité de gestion des ouvrants.

Sur la base des critères de confort choisis (catégories de confort I, II et III) un intervalle de température ambiante est établi (Cf. Figure 49 et Figure 50). Les bornes de cet intervalle dépendent de la température extérieure, d’où le caractère « adaptatif ».

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.

Figure 49 : NF EN 15251 (août 2007) : Seuils de confort thermique définis par la norme.

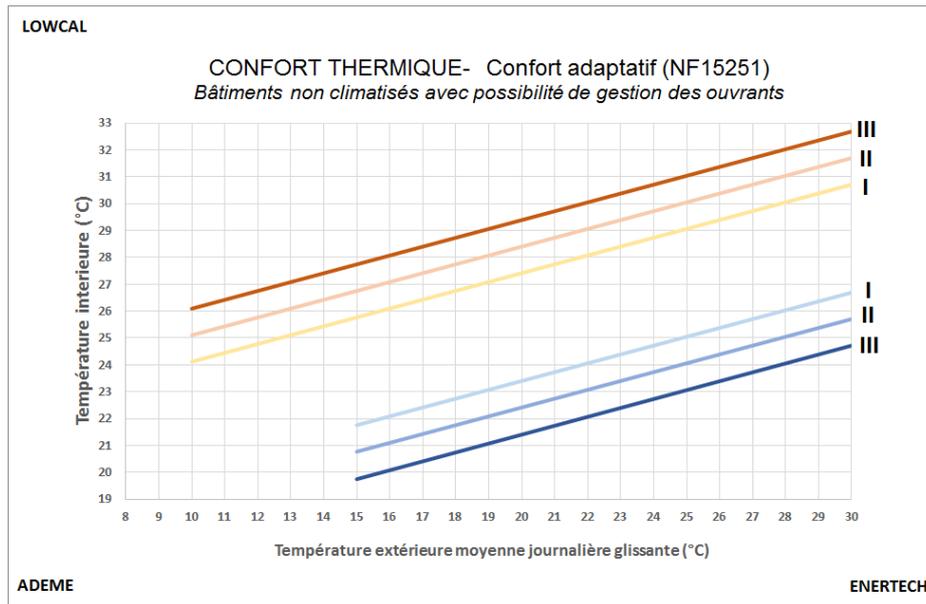


Figure 50 : Représentation de l’approche adaptative du confort estival selon la NF15251

La température extérieure servant de référence au diagramme n’est pas la température extérieure brute. Elle est le résultat d’une moyenne journalière glissante permettant d’intégrer un « effet mémoire » adaptatif (on supporte d’autant moins la chaleur qu’elle survient de manière brusque). Les figures 49 et 50 permettent de détailler et de visualiser cette température extérieure en moyenne glissante.

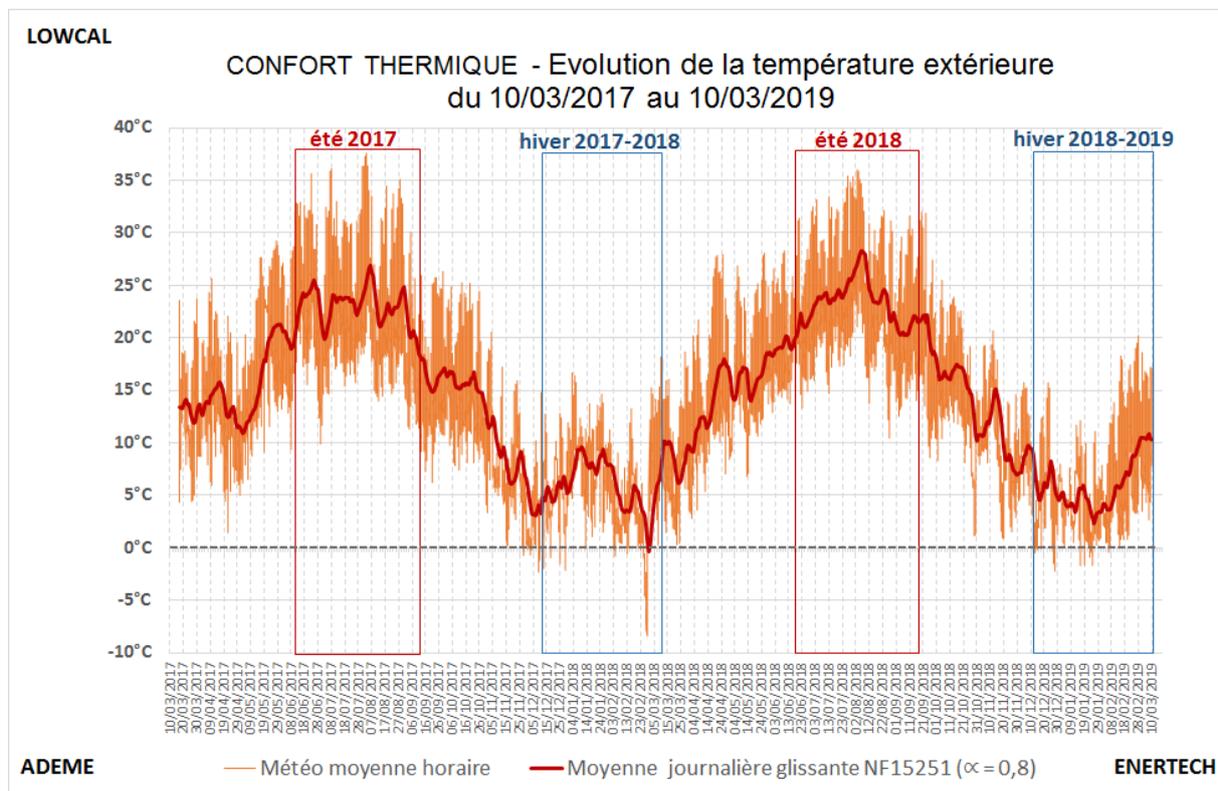


Figure 51: Evolution de la température extérieure et de sa moyenne glissante selon NF15251(α=0,8).

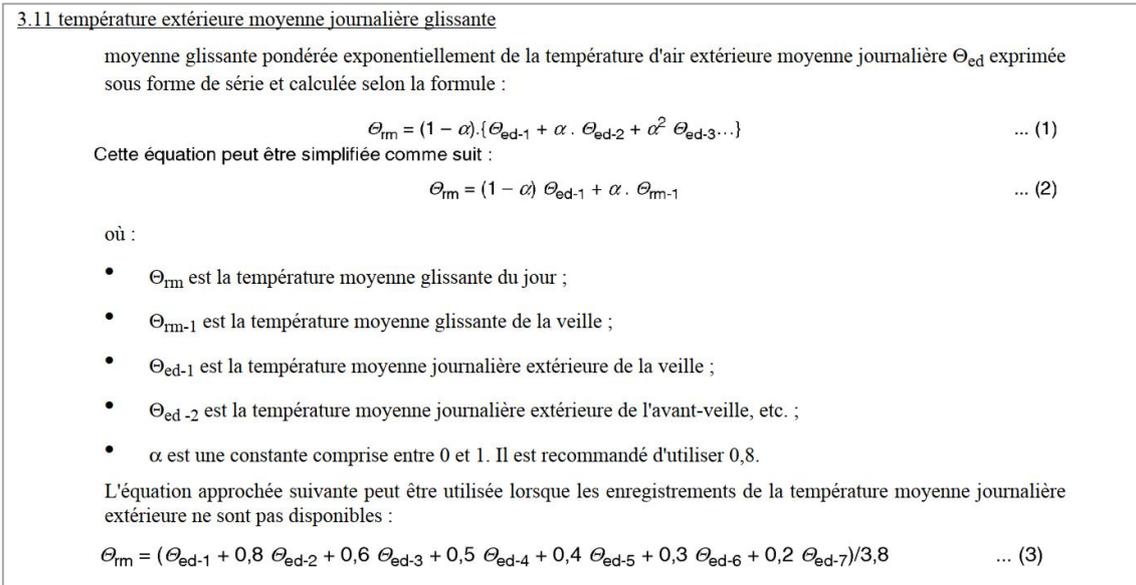


Figure 52: NF EN 15251 (août 2007) : Définition de la température extérieure moyenne journalière glissante.

Confort d’été du LowCal selon la NF 15251

La Figure 53 montre qu’en occupation estivale la température moyenne du LowCal n’apporte pas entière satisfaction selon la NF15251 car elle serait trop froide (72% du temps d’occupation en dessous de la catégorie I et 9% en dessous de la catégorie III).

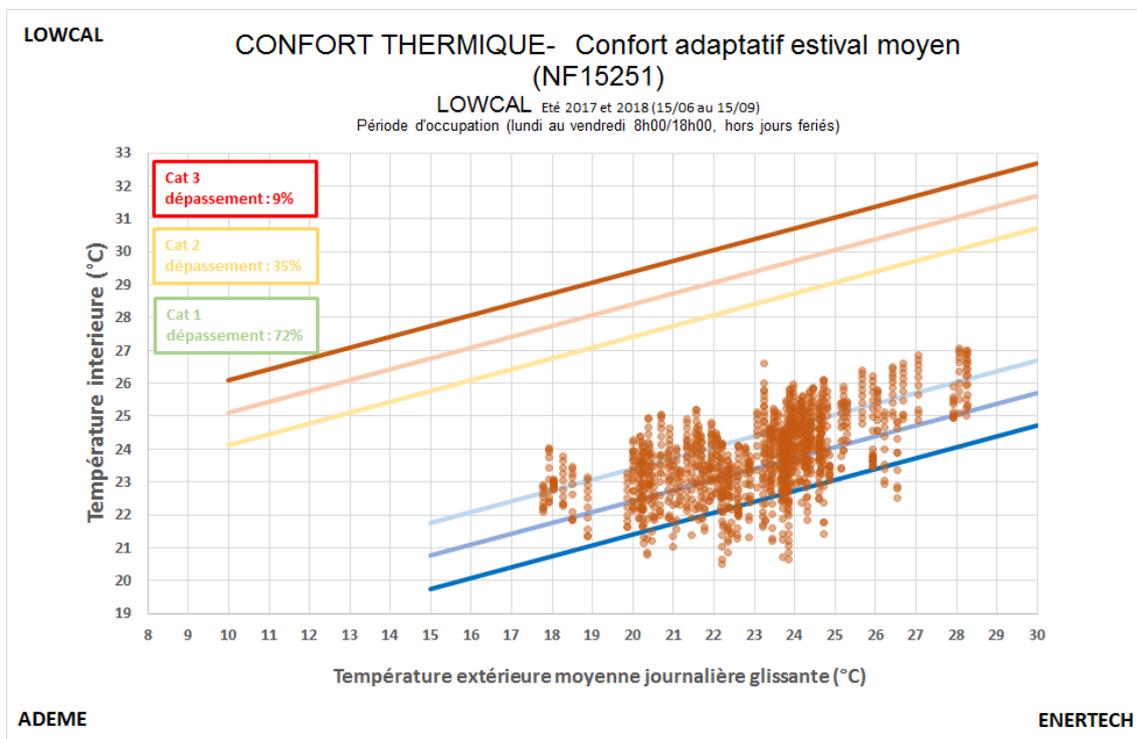


Figure 53 : Approche adaptative du confort estival selon la NF15251.

La Figure 54 illustre la répartition des points en dessous de la limite basse de la catégorie III (9 % du temps) à l’échelle de la journée. On peut ainsi constater que la quasi-totalité de ces points ont eu lieu en début de matinée sous l’effet du rafraîchissement matinal (volontaire) pratiqué par ouverture des fenêtres.

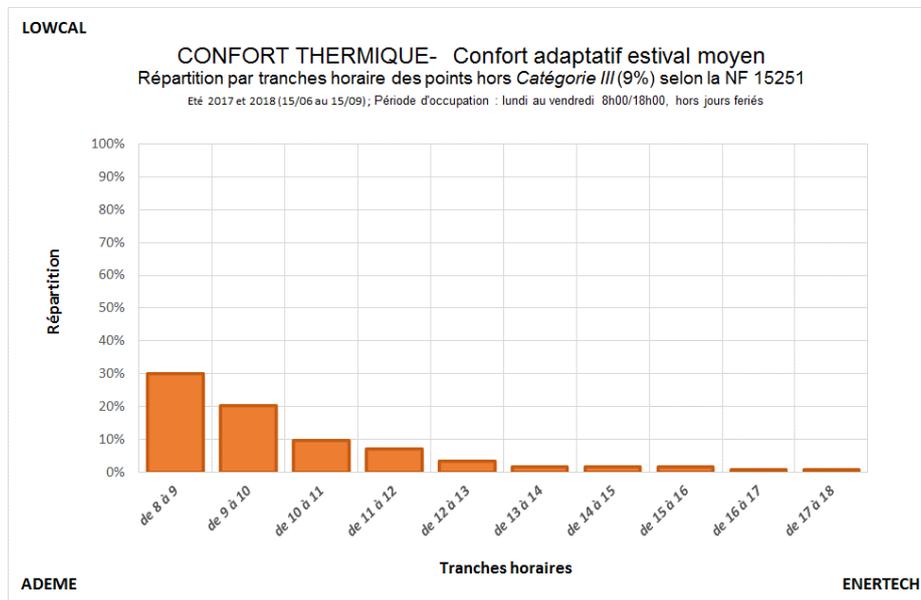


Figure 54 : Répartition par tranche horaire des points hors catégorie III (trop froids) selon la NF 15 251.

La Figure 59 reprend les résultats des figures 53 et 56. Il s’agit là d’estimer l’influence de la constante α proposée dans le calcul de l’équation simplifiée de la température moyenne journalière glissante selon la NF15251. En effet, cette constante devrait être ajustée en fonction de l’inertie du bâtiment étudié. Cependant, nous pouvons constater que les écarts de taux de dépassement d’une moyenne glissante à l’autre sont plutôt négligeables.

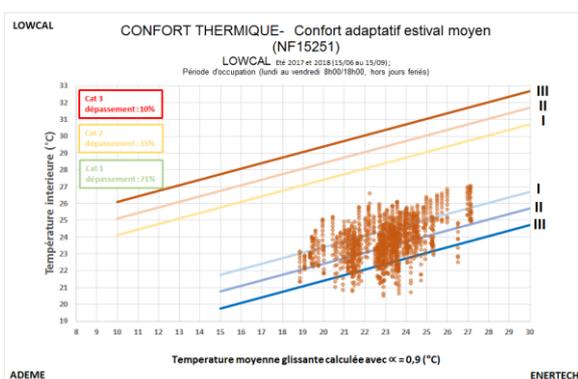


Figure 55 : Approche adaptative NF15251 $\alpha = 0,9$

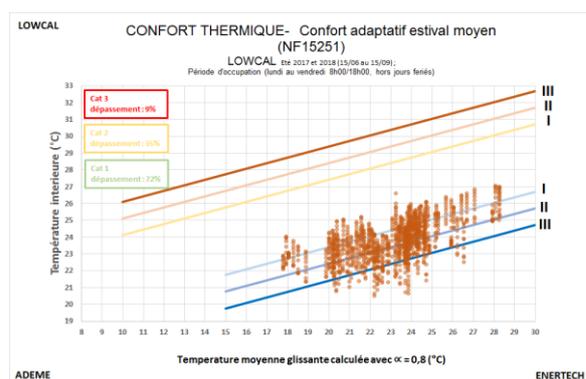


Figure 56 : Approche adaptative NF15251 $\alpha = 0,8$

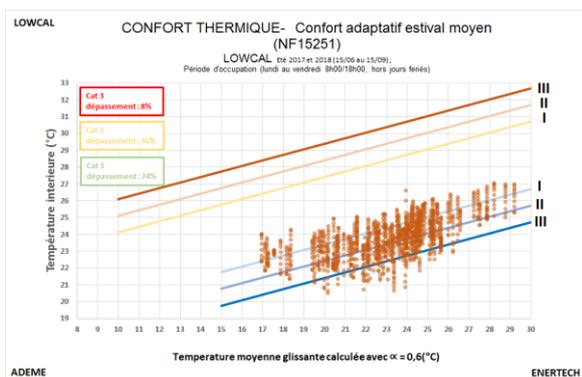


Figure 57 : Approche adaptative NF15251 $\alpha = 0,6$

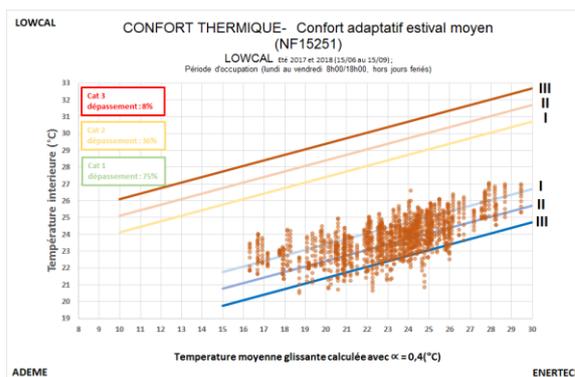


Figure 58 : Approche adaptative NF15251 $\alpha = 0,4$

	$\alpha = 0,9$	$\alpha = 0,8$	$\alpha = 0,6$	$\alpha = 0,4$
Cat. I	71%	72%	74%	75%
Cat II	35%	35%	35%	36%
Cat III	10%	9%	8%	8%

Figure 59 : Tableau des taux de dépassement de l’ambiance estivale moyenne du LowCal par catégorie pour différents paramètres α de la moyenne glissante définie dans la NF 15 251.

3.5 Confort d’hiver

La période « hivernale » sélectionnée pour l’étude du confort hygrothermique en hiver s’étale du 10/12/2017 au 10/03/2018 puis du 10/12/2018 au 10/03/2019. **La température moyenne ambiante du LowCal sur cette période est de 20,3°C.**

On peut noter les extrema suivants :

- Le jour le plus froid : samedi 30/12/2017 avec une ambiance moyenne journalière de 17,8 °C.
- Le jour ouvré le plus froid : lundi 07/01/2019 avec une ambiance moyenne journalière de 18,0 °C.
- La semaine la plus froide : entre le 05/02/2018 et le 11/02/2018 avec une ambiance moyenne hebdomadaire de 18,5°C.

3.5.1 Evolution des températures sur l’hiver 2017-2018

La Figure 60 illustre l’évolution de la température extérieure et des températures intérieures de l’air (moyenne sur 24 locaux) et de la masse (sonde à l’intérieur d’un mur de refend en briques de terre crue) entre le 10/12/2017 et le 10/03/2018.

On notera les très faibles variations de la température de la masse (+/-1,5°C) autour d’une moyenne de 19,4°C sur l’hiver 2017-2018.

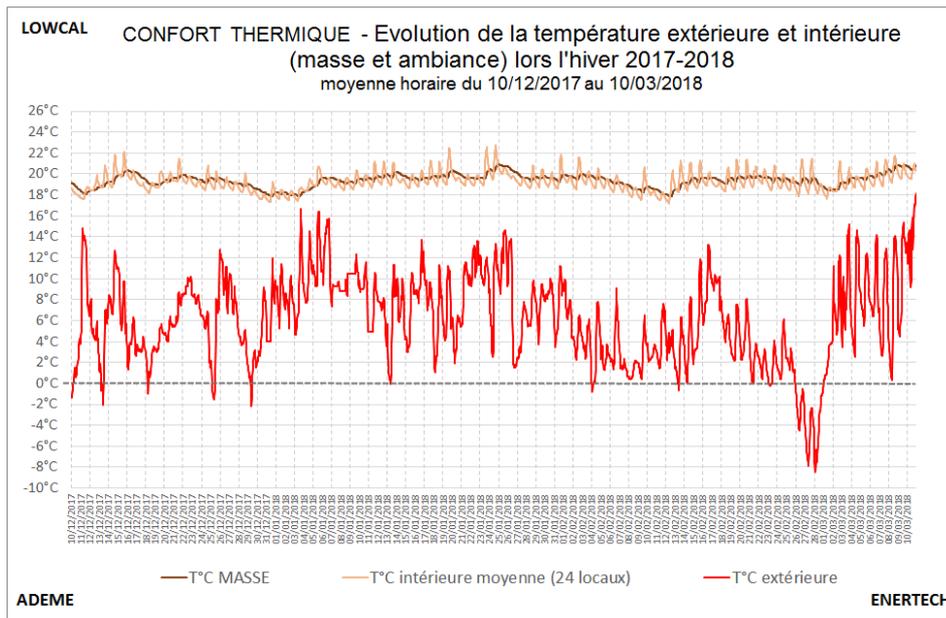


Figure 60 : Evolution de la température extérieure et des températures intérieures (air et masse).

3.5.2 Evolution des températures lors de la semaine la plus froide dans le bâtiment

La Figure 61 illustre l'évolution des températures intérieures de l'air et de la masse (mur de briques de terre crue) et de la température extérieure lors de la semaine la plus froide dans le bâtiment (semaine du 05/02/2018 au 11/02/2018).

On constate une chute de la température de la masse de 2°C en une semaine malgré un fonctionnement quotidien des radiateurs sur leur plage horaire programmée (8h-19h).

La température d'air intérieure suit la même tendance que celle de la masse, avec des augmentations journalières 3 fois plus importantes lorsque la journée est ensoleillée (comparer par exemple jeudi et vendredi).

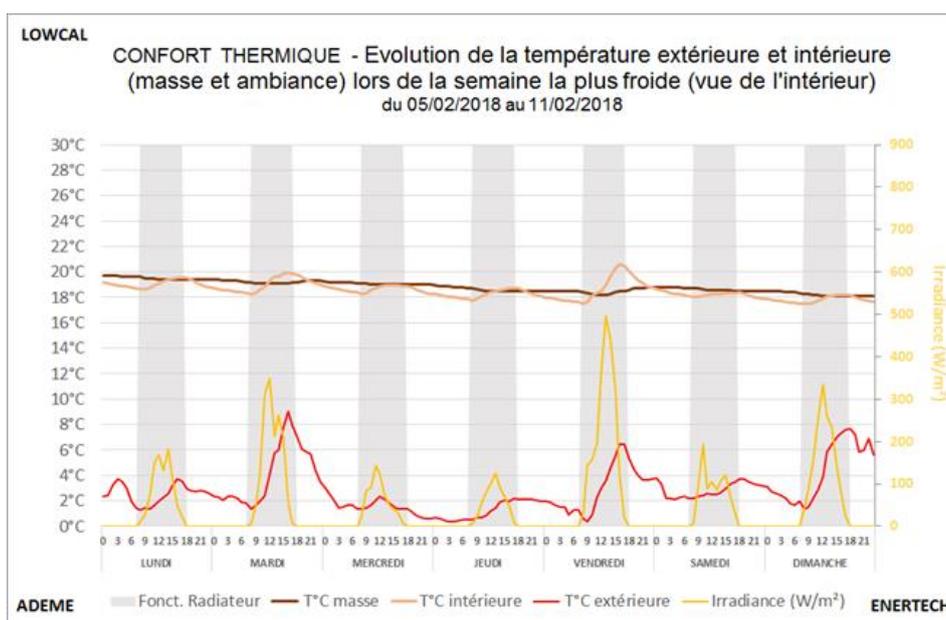


Figure 61 : Evolution des températures intérieures (air et masse) durant la semaine la plus froide dans le bâtiment.

Cette semaine du 05/02/2018 au 11/02/2018 a aussi fait l’objet d’un paragraphe dans le rapport sur les consommations d’énergie du bâtiment puisqu’il en a résulté l’enclenchement de la dérogation horaire du système de chauffage (Cf Figure 62).

On visualise mieux dans ce paragraphe l’impact de la journée ensoleillée du vendredi 09 février 2018 sur la température de la masse, qui cesse de décroître pour remonter de + 0,5°C.

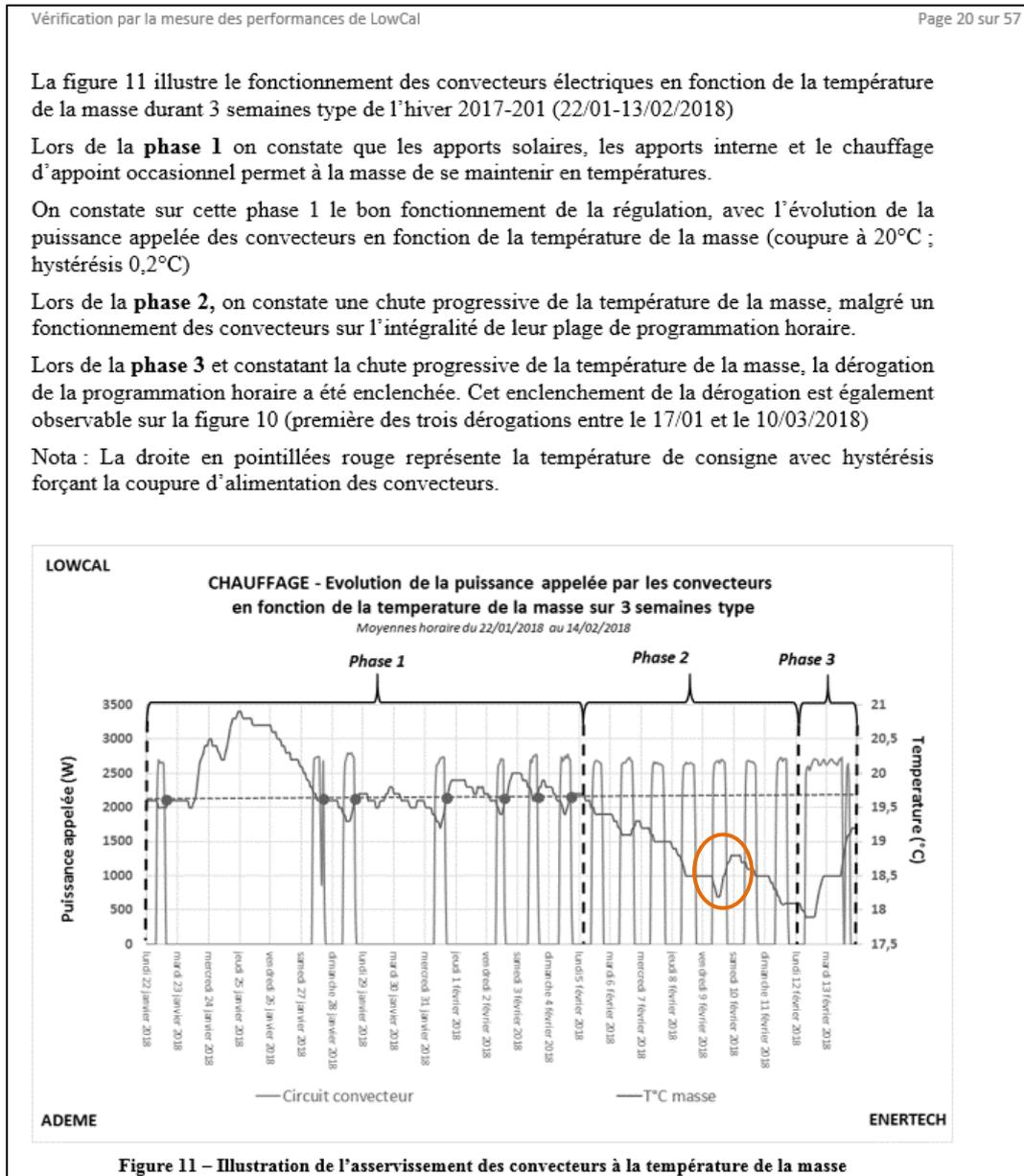


Figure 62 : Rapport APR ADEME LowCal ; Sous-tâche 1.2 ; §3.2.1.

3.5.3 Evolution des températures lors de la semaine la plus froide (T°C extérieure)

La Figure 63 illustre l’évolution des températures intérieures (ambiance et masse) et de la température extérieure lors de la semaine la plus froide du point de vue de la météo (semaine du 26/02/2018 au 04/03/2018).

On constate qu’en début de semaine, si la température extérieure est très basse, l’ensoleillement est important ce qui permet de maintenir (chauffage d’appoint compris) une température ambiante de 18 à 21°C dans le bâtiment.

L’impact de l’ensoleillement sur la température ambiante est clairement visible à l’échelle de la demi-journée, ainsi que sur la température de la masse avec une amplitude plus faible et un temps de réponse plus long.

Notons ici que le chauffage d’appoint (4 convecteurs électriques de 1000W unitaire, situés au RdC, pour l’ensemble du bâtiment) a fonctionné en continu du jeudi matin au vendredi soir, mais c’est seulement à la suite du pic d’irradiance du vendredi que la température de l’air intérieur et celle de la masse ont significativement augmenté.

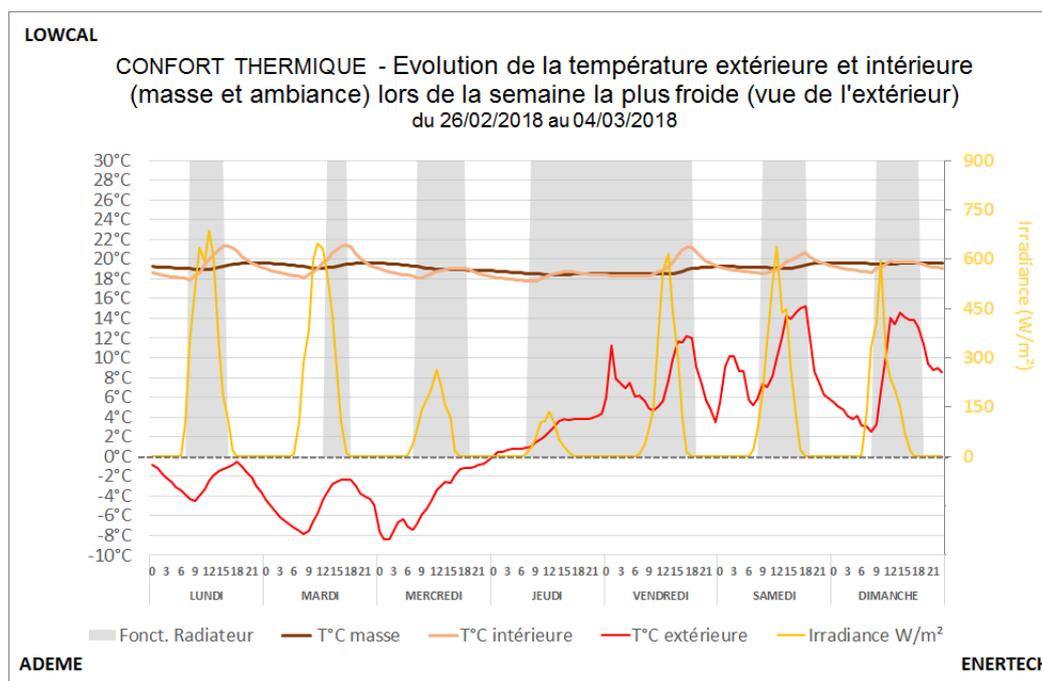


Figure 63 : Evolution des températures intérieures (ambiance et masse) lors de la semaine la plus froide.

3.5.4 Courbes de fréquences cumulées en occupation

La Figure 64 montre que la température ambiante moyenne en occupation a oscillé entre 17,2°C et 24,7°C, avec une moyenne à 20,3°C durant les périodes hivernales 2017/2018 et 2018/2019. On notera que la température ambiante moyenne a été légèrement inférieure à 19°C près de 25% du temps durant cette période.

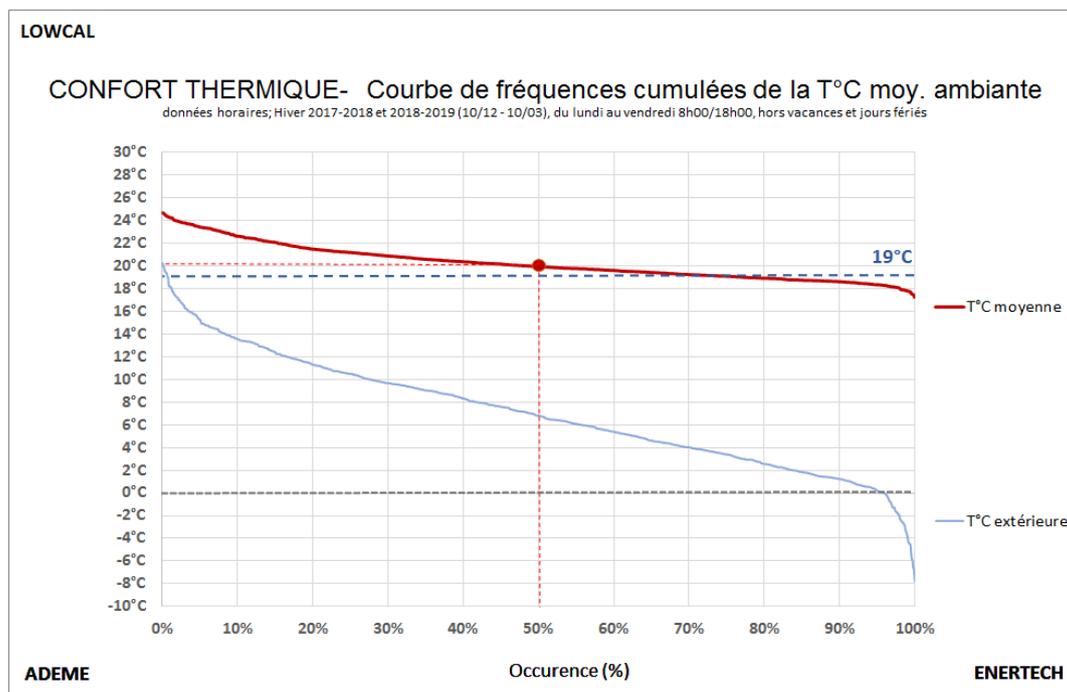


Figure 64 : Courbe de fréquences cumulées des températures moyennes horaires intérieure et extérieure.

La Figure 65 présente l'ensemble des courbes de fréquences cumulées des températures des locaux étudiés.

On constate que, comme pour le confort d'été (§3.4.3), les températures d'hiver des différents bureaux sont plus hétérogènes au niveau des maximales que des minimales. La tendance montre que les bureaux les plus chauds se trouvent au sud et à l'étage plutôt qu'au RdC (dans une moindre mesure).

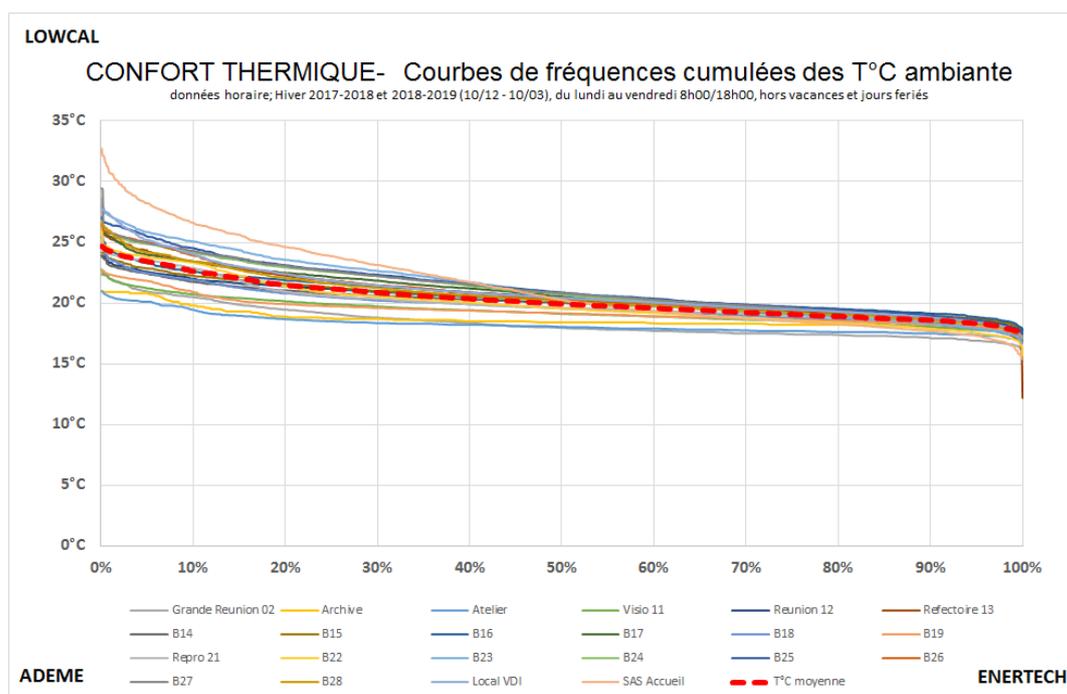


Figure 65 : Courbes de fréquences cumulées des températures moyennes horaires intérieures des locaux.

3.5.5 Températures moyennes par locaux

La Figure 66 présente les températures ambiantes (moyenne, maximale et minimale) horaire pour chaque local.

On notera que les 3 locaux ayant une température moyenne inférieure à 19°C sont le local archives, l’atelier et la grande salle de réunion, soit 3 locaux situés au rez-de-jardin qui est un niveau semi-enterré et peu occupé.

On notera également que les températures minimales sont en partie liées à la surventilation naturelle pratiquée le matin dans certains bureaux par ouverture des fenêtres, suite à la préconisation de MEDIECO dans son rapport sur la Qualité d’Air Intérieure (QAI) de LowCal. Ce rapport soulignait que l’intermittence de fonctionnement des CTA décentralisées du bâtiment « ne suffit pas à abaisser les concentrations en COVL et COVG accumulées pendant la nuit et surtout les week-ends »⁶.

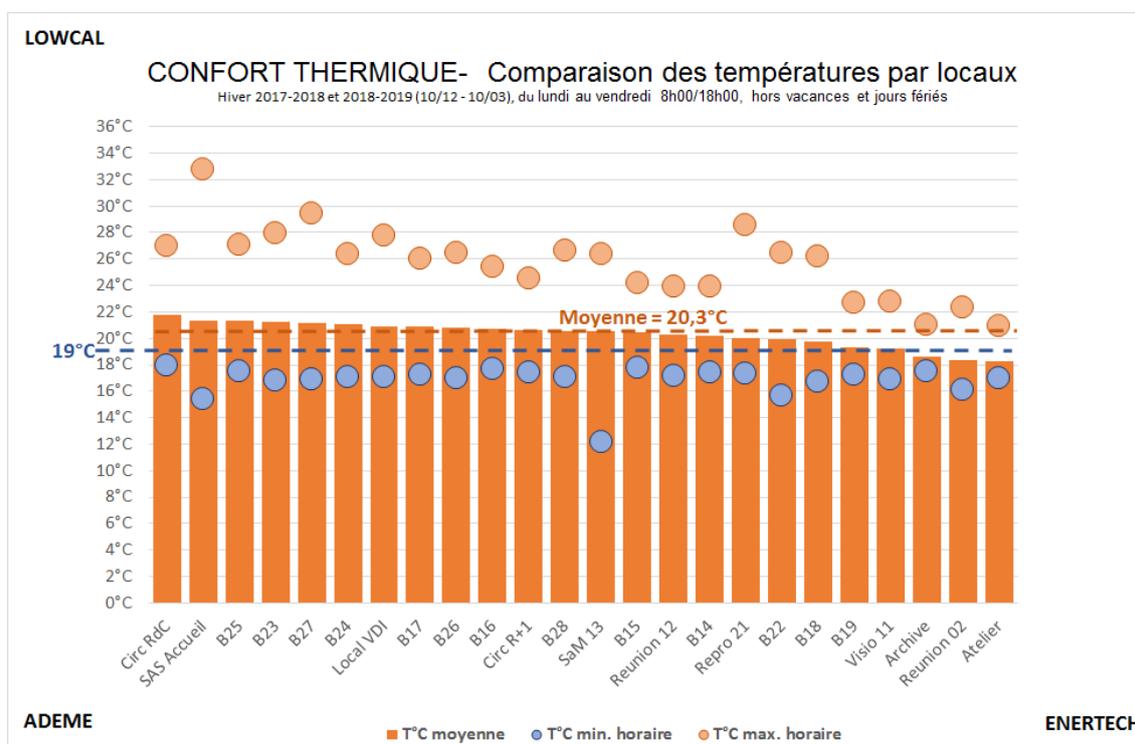


Figure 66 : Histogramme des températures intérieures (moy, min, max) de chaque local en occupation.

3.5.6 Implication des occupants

De même qu’évoqué au §3.4.5 pour le confort d’été, l’implication des occupants est essentielle à la maximisation du confort et à la minimisation des consommations de chauffage, en hiver.

L’enjeu principal en hiver est d’optimiser les apports solaires. L’utilisation des protections extérieures est donc réduite à celle de l’anti-intrusion, les stores intérieurs permettant d’éviter l’éblouissement. Les fenêtres sont, bien entendu, ouvertes au minimum. Ces consignes sont rappelées dans le livret d’accueil (Figure 67).

⁶ RAPPORT DE MESURES PASSIVES ET DYNAMIQUES QAI N° QAI-017-10-13 - 16 octobre 2017 – Evaluation de la qualité de l’air intérieur (QAI) à réception & exploitation du siège Enertech (Medieco)

3.2 Consignes spécifique pour l’hiver

À cette saison, il s’agit de maximiser les apports solaires en minimisant les déperditions de chaleur. L’ensemble des volets et brise-soleils doivent être ouverts en occupation lorsque le rayonnement solaire atteint la façade associée. La protection contre l’éblouissement doit donc se faire uniquement avec les stores intérieurs. Le renouvellement de l’air se réalise avec la ventilation mécanique. En inoccupation le week-end, le maximum de volets restent ouverts en respectant les consignes relative à l’anti-intrusion. Il s’agit donc des volets hors façade nord de l’étage et des pièces 17 et 18.

Figure 67 : Consignes spécifiques pour le confort d’hiver ; Livret d’accueil du LowCal.

L’appoint de chauffage électrique est asservi à la température de masse du bâtiment sur une consigne de 20°C. La température moyenne obtenue est proche de cette valeur. En cohérence avec cette démarche, les occupants sont suffisamment vêtus pour être parfaitement à l’aise dans ces conditions (pantalon, pull : Clo. autour de 1.5).

3.5.7 Polygones de confort (ASHRAE & COSTIC)

Le polygone de confort proposé par la norme « Standard 55 » de l’ASHRAE ainsi que celui du COSTIC sont présentés dans le paragraphe 3.4.6.

On notera que le polygone de confort proposé par ASHRAE est valable pour des tenues vestimentaires plutôt estivales (Clo. de 0.5 à 1).

Pour des tenues hivernales, la norme indique que la zone de confort est décalée vers la gauche en fonction d’une méthode de calcul informatique (Cf. annotation en haut à gauche du graphique ASHRAE, Figure 29 paragraphe 3.4.6).

La Figure 68 présente une extension approximative et non calculée de la zone de confort pour un Clo. de 1.5.

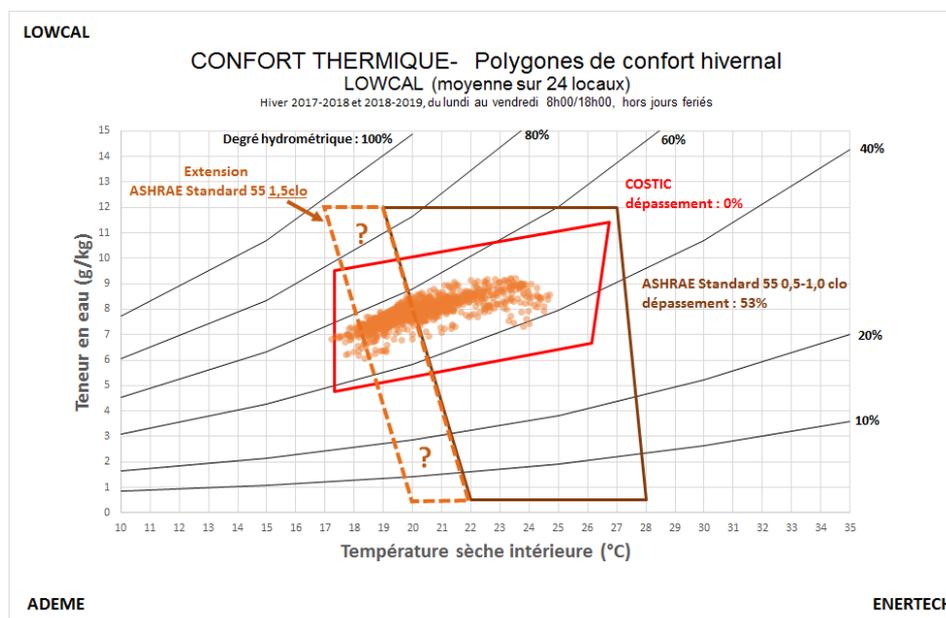


Figure 68 : Polygones de confort ASHRAE et COSTIC.

On constate que le confort hivernal est assez satisfaisant dans le bâtiment tant du point de vue du polygone COSTIC que de celui – plus approximatif - du polygone ASHRAE étendu manuellement aux habillements hivernaux (Clo.=1.5).

3.5.8 Confort adaptatif selon la norme NF15210

La norme NF EN 15251 est présentée au paragraphe 3.4.8. Nous tentons ici d’étendre sa définition aux températures extérieures hivernales (équation simplifiée avec $\alpha = 0,8$).

Cette extension hivernale n’est pas intégrée par la norme NF15251, aussi le graphe de la Figure 69 n’est donné qu’à titre indicatif. On constate notamment que les valeurs hautes restent très acceptables (niveau II), ce qui démontre que la stratégie de chauffage par le soleil n’occasionne pas selon cette approche d’inconfort de type « surchauffe ».

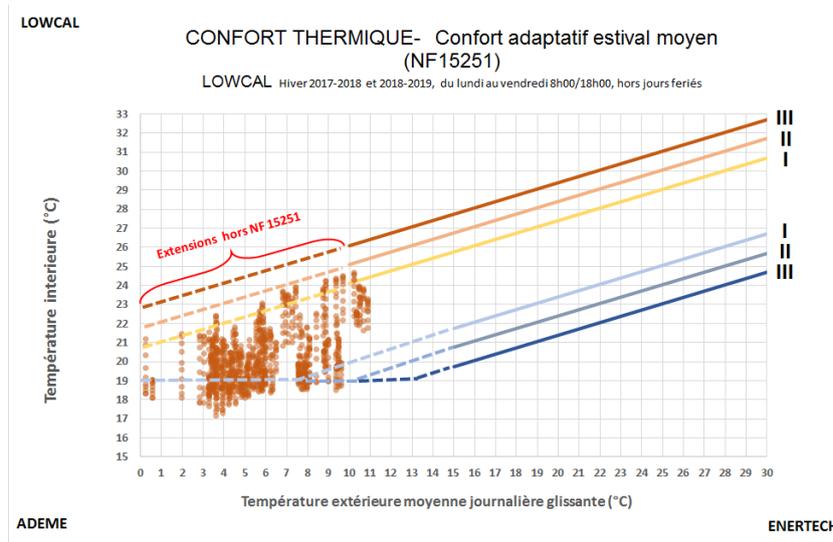


Figure 69 : Approche adaptative du confort estival selon la NF15251

La Figure 70 présente la répartition journalière des températures horaire inférieures à 19°C.

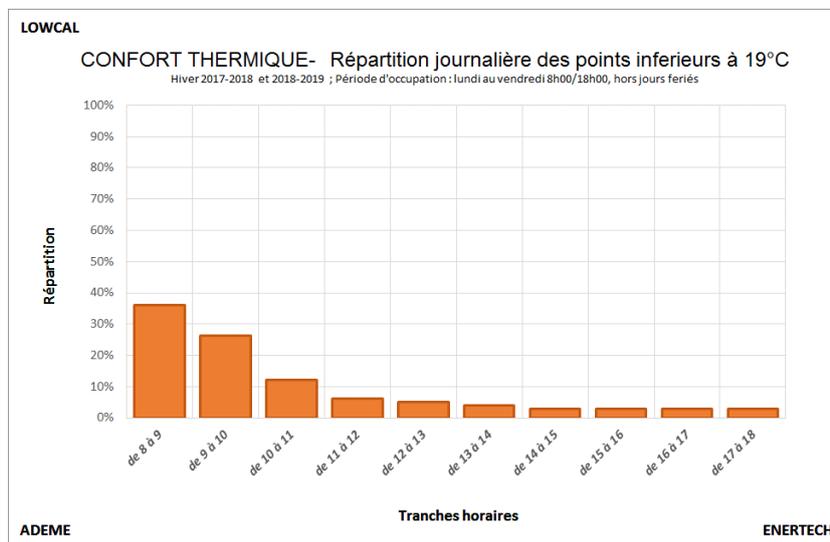


Figure 70 : Répartition par tranche horaire des points d’ambiance en dessous de 19°C.

On peut constater que la quasi-totalité de ces points ont eu lieu en début de matinée, ce qui est imputable en partie à la surventilation matinale pratiquée dans quelques bureaux par ouverture des fenêtres suite aux préconisations de MEDIECO (voir §3.5.5).

3.6 Questionnaire soumis aux occupants

Un questionnaire anonyme relatif au confort thermique a été envoyé au début de l’été, le 4 juin 2018, aux 24 personnes travaillant dans le bâtiment.

Les participants à cette enquête ont en moyenne entre 30 et 50 ans, 80 % sont des hommes et 70 % ont travaillé auparavant dans les anciens locaux d’Enertech à Félines-sur-Rimandoule.

Concernant le confort d’hiver, 30% des occupants ont légèrement froid, 55% aimeraient avoir un peu plus chaud, mais 90% d’entre eux trouvent cette température acceptable voire très acceptable. Outre le caractère nécessairement « impliqué » des personnes interrogées, on peut noter que l’absence de paroi froide, l’absence de courant d’air (le bâtiment ayant une étanchéité à l’air de niveau passif) mais aussi la chaleur « esthétique » de l’ambiance (matériaux biosourcés, sols colorés, mobilier en bois) contribuent naturellement à l’acceptation d’une température sèche légèrement plus froide que le standard habituel, à iso-confort.

Concernant le confort d’été, 37% des occupants ont légèrement chaud, 41% aimeraient avoir un peu plus froid, mais 90% d’entre eux trouvent cette température acceptable voire très acceptable. Ces données ne sont pas strictement en cohérence avec les interprétations faites par les différentes méthodes utilisées pour l’évaluation du confort d’été. En effet, la température moyenne n’a jamais dépassé 28°C, la norme NF15251 et les indices PMV PPD nous indiquent même qu’il ferait parfois trop froid dans les locaux, et les points hors polygone de confort ASHRAE ne mettent pas en cause la température mais l’humidité (qui est peu ou pas contrôlable sans rafraîchissement actif). On sait néanmoins que le ressenti individuel du niveau de chaleur est très lié au taux d’hygrométrie, ce qui pourrait expliquer les résultats du questionnaire.

Ambiance hygrothermique d’hiver	65 % jugent la température confortable, 30 % légèrement froide et cela indépendamment de l’âge, du sexe ou de l’orientation du bureau
	Toutefois plus de 90 % des occupants trouvent cette température acceptable voire très acceptable
	55% aimeraient avoir un peu plus chaud
	Pour plus de 80 % le confort thermique en hiver se situe entre 19 et 20°C
	Pas de phénomène de paroi ou de fenêtre froide constaté ni de courant d’air froid sauf à un poste
	L’humidité de l’air est confortable pour 90 % des occupants
	Tout de même un manque de chaleur noté, manque d’un point chaud dans le bureau en cas de journée avec peu d’apports solaires ou de métabolisme en baisse
Ambiance hygrothermique en été	54 % jugent la température confortable, 37 % légèrement chaude. Le bureau Sud Ouest de l’étage est celui perçu comme le plus chaud.
	Toutefois plus de 90 % des occupants trouvent cette température acceptable voire très acceptable
	41 % aimeraient avoir un peu plus froid ou plus froid
	Pour les 3/4 des occupants le confort thermique d’été se situe au-dessus de 24°C
	La grande majorité des occupants apprécie l’utilisation des protections solaires extérieures mais usage difficile pour les volets massifs (Est et Ouest)

Figure 71 : Tableau de synthèse du traitement des réponses au questionnaire sur le confort.

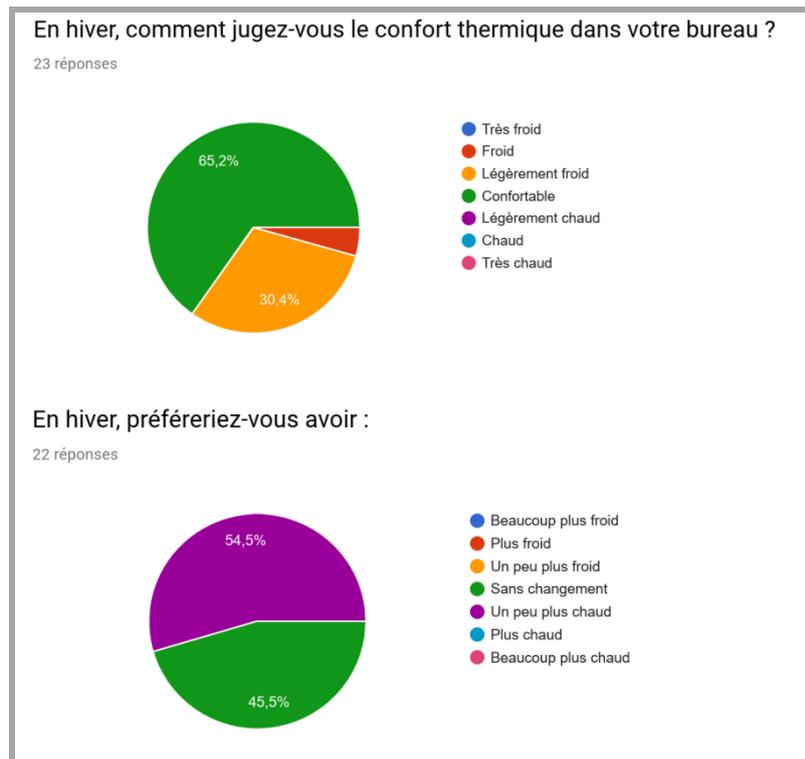


Figure 72 : Traitement de deux questions relatives au confort d’hiver.

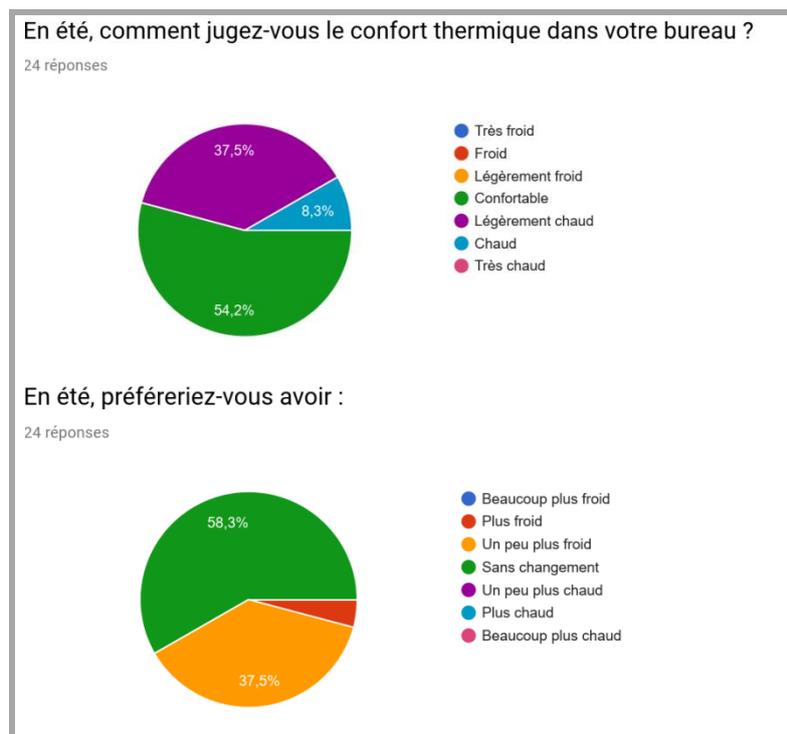


Figure 73 : Traitement de deux questions relatives au confort d’été.

4 VENTILATION DOUBLE-FLUX DECENTRALISEE

4.1 Equipements et métrologie

4.1.1 Equipements

La ventilation est de type double flux décentralisée par pièce avec récupération de chaleur par échangeur à plaques (Caisson ComfoAir70 de Zehnder). Chaque caisson est commandé par un interrupteur simple allumage à voyant situé à l’entrée du local desservi (Figure 74). Chaque caisson dispose en façade d’un écran tactile offrant le choix entre 4 vitesses de fonctionnement.

Les bureaux disposent d’un ou plusieurs caissons de ventilation (21 CTA pour 19 bureaux), prenant et rejetant l’air à travers la façade. Quatre caissons fonctionnent en permanence aux heures de présence car ils assurent la ventilation des sanitaires et du local douche.

A noter que les échangeurs des caissons réagissent au gradient d’humidité entre l’air intérieur et l’air extérieur grâce à la porosité à la vapeur de la matière qui les constitue. Ce dispositif a pour but d’éviter un soufflage trop sec en hiver. Ce phénomène (mesuré) est étudié en particulier dans le paragraphe 3.4.6 relatif au confort d’été.



Caisson de ventilation décentralisé avant pose.



En pointillés, le conduit double flux traversant le mur.



Interrupteur manuel à voyant par caisson.



Caisson dans un bureau.

Figure 74 : Système de ventilation double flux décentralisé par pièce avec commande manuelle.

La grande salle de réunion dispose de sa propre CTA double flux, modèle ComfoAir 550 Luxe de Zehnder. Cette ventilation est très peu utilisée.

4.1.2 Métrologie

Mesure des consommations électriques

Le suivi des consommations électriques du poste ventilation a été réalisé avec le système Multivoies (mesure électrique en tableau au pas de temps de 10 minutes).

Les consommations d’électricité de 15 caissons de ventilation décentralisés ont pu être individualisées à partir des tableaux de dérivation situés au RDC et au R+1 (Figure 75).

Les consommations d’électricité des 6 autres CTA sont déterminées grâce au suivi de quelques départs dédiés au TGBT ;

- Circuit ventilation RDJ
- Circuit ventilation RDC Est
- Circuit ventilation RDC Ouest
- Circuit ventilation R+1 Est
- Circuit ventilation R+1 Ouest

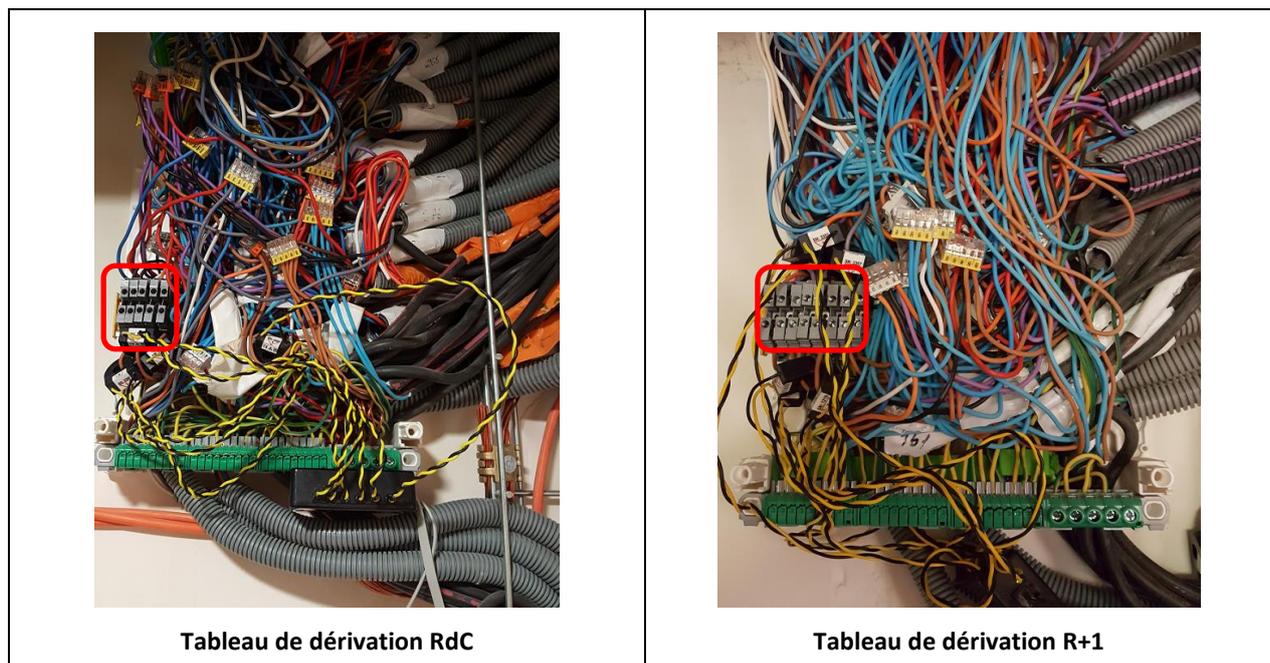


Figure 75 : Suivi des départs électriques des caissons de ventilation dans les tableaux de dérivation.

Mesure des débits de ventilations :

La mesure en continu des débits de soufflage et d’extraction a été effectuée sur 5 centrales de ventilation (Figure 76).

Cette mesure de débit se base sur une mesure de différence de pression aux bornes de l’échangeur. La relation mathématique liant la différence de pression au débit a été établie sur l’ensemble des caissons instrumentés grâce à un cône de mesure.

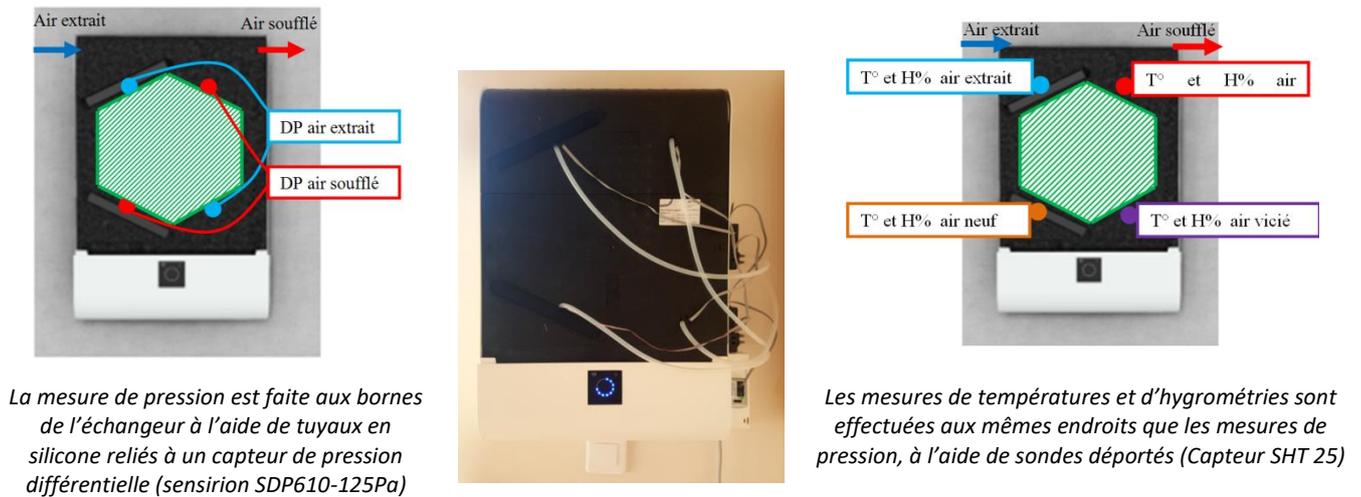


Figure 76 : Mesure effectuée sur les caissons de ventilation décentralisés.

NB : Le capteur utilisé provient de notre fournisseur historique Omégawatt, qui a modifié un capteur existant pour les besoins de la mission, dans le but de mesurer de très faibles différences de pression.

4.2 Résultats

4.2.1 Consommation électrique

Consommation générale

La consommation du poste ventilation représente 4% de la consommation totale d'électricité du bâtiment avec 195 kWh_{él}/an soit 0,27 kWh_{él}/m²_{shon}/an.

La Figure 77 compare les consommations du poste ventilation sur plusieurs bâtiments de bureaux ayant fait l'objet d'une campagne de mesure réalisée par ENERTECH dans les 10 dernières années. Cette comparaison permet d'apprécier le ratio de consommation extrêmement faible du poste ventilation du bâtiment LowCal.

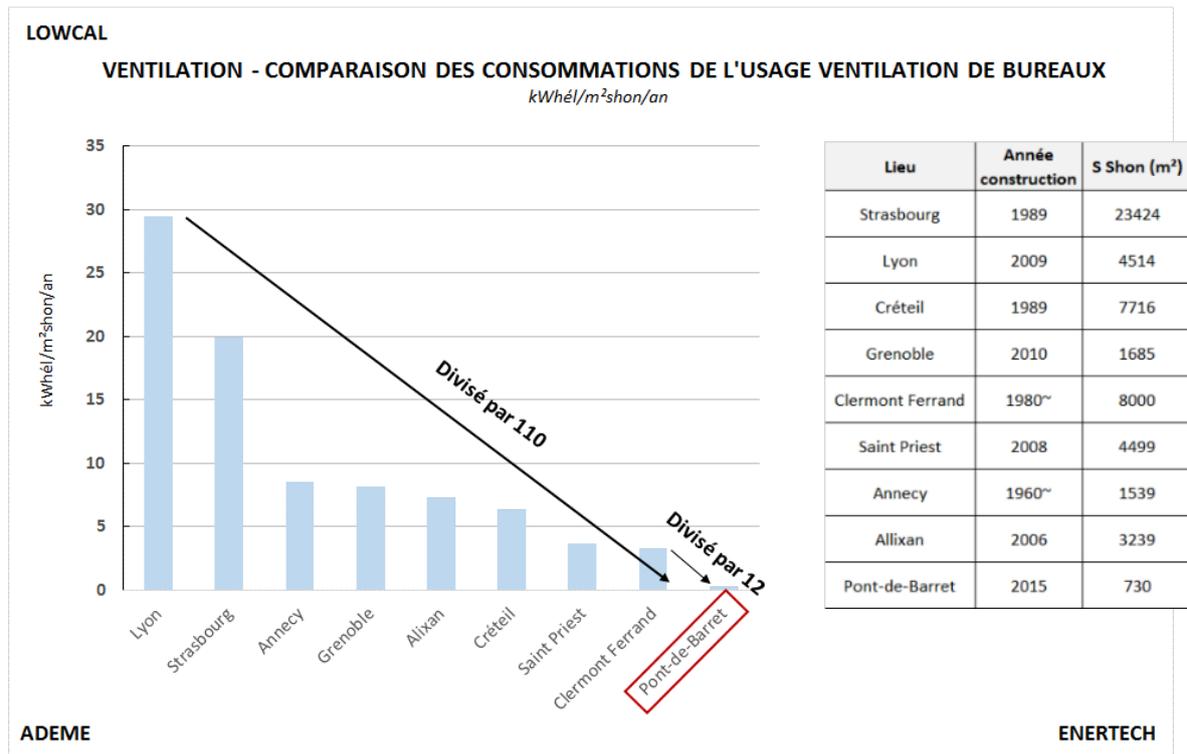


Figure 77 : Comparaison des consommations électriques du poste ventilation sur plusieurs bâtiments de bureaux.

Cette chute de consommation est rendue possible grâce à une maîtrise du nombre d’heures de fonctionnement (extinction systématique en inoccupation), une adaptation des pièces ventilées à l’occupation, ainsi qu’une puissance spécifique (puissance électrique nécessaire à la ventilation d’un certain débit) très basse du fait de l’absence de réseau de distribution.

Rappelons ici (point traité dans le livrable 2.2) que la qualité de l’air intérieure du bâtiment LowCal est bonne et que la performance électrique du poste ventilation n’est pas le fait d’un déficit de renouvellement d’air.

Répartition des consommations (vue du TGBT)

La Figure 78 présente la répartition des consommations de ventilation par circuit (donc par zone).

La partie Ouest du bâtiment représente plus de la moitié de la consommation. Ce ratio est cohérent avec la répartition des occupants puisque la partie Est abrite la quasi totalité des locaux à occupation discontinue : visioconférence, réfectoire, salle de réunion et reprographie.

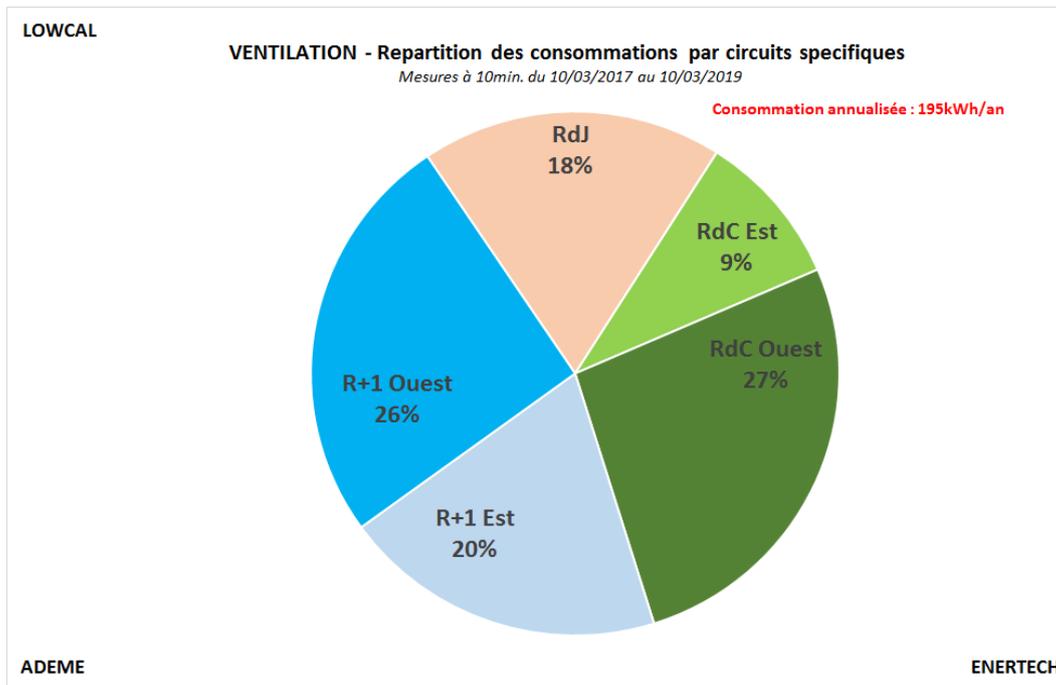
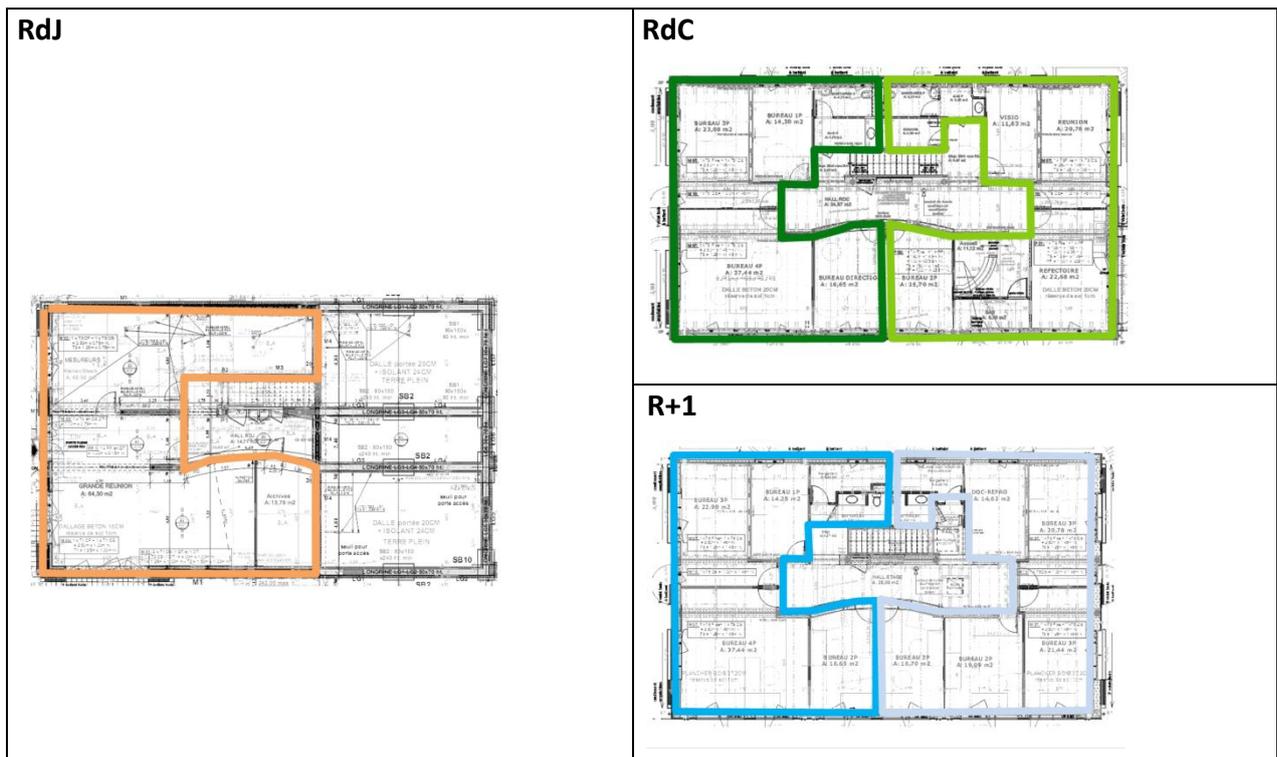


Figure 78 : Répartition des consommations de ventilation par zone.



Profil de fonctionnement

La Figure 79 illustre le profil de fonctionnement de l’ensemble des ventilations.

En semaine, les heures d’ouverture du bâtiment s’étendent globalement de 7h à 20, avec quelques dépassements occasionnels. La plage horaire de fonctionnement observée montre que les allumages/extinctions des caissons sont bien effectués via les interrupteurs par pièce plutôt que via l’interrupteur de coupure général.

Les consommations d’électricité de la ventilation en inoccupation sont nulles.

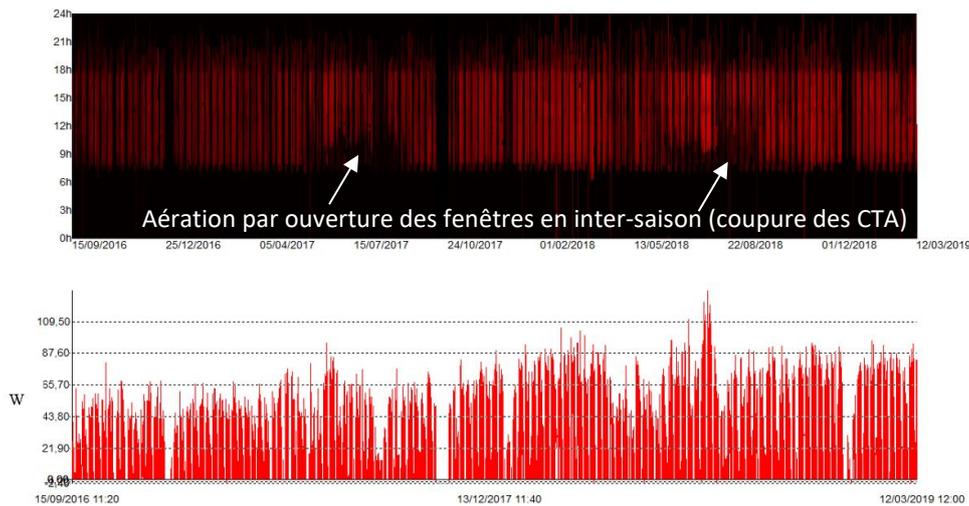


Figure 79 : Profil biannuel de puissance appelée par l'ensemble des caissons de ventilation.

Consommations et puissances appelées (par caisson)

Les graphiques en Figure 80 et Figure 81 montrent que les ventilations des bureaux 27, 17, 21, 29 et 19 fonctionnent en permanence aux heures d'occupation du bâtiment.

Ces caissons fonctionnent ainsi 40% du temps et consomment en moyenne 17 kWh_{él}/an, tandis que les autres caissons fonctionnent entre 5 et 20% du temps et consomment en moyenne 4,5 kWh_{él}/an. Le taux de fonctionnement dépend du comportement des occupants (la commande étant manuelle) mais aussi du taux d'occupation des bureaux. De plus, les CTA 19, 21 et 29 assurent l'extraction des sanitaires et douches accolées ce qui explique leur fonctionnement prolongé.

A noter que les bureaux 27 et 17 disposent chacun de deux caissons indépendants. Seule la somme des deux caissons a pu être suivie pour ces bureaux. Les consommations unitaires des CTA 27 et 17 (n°1 et n° 2) ont été établies arbitrairement de manière égale.

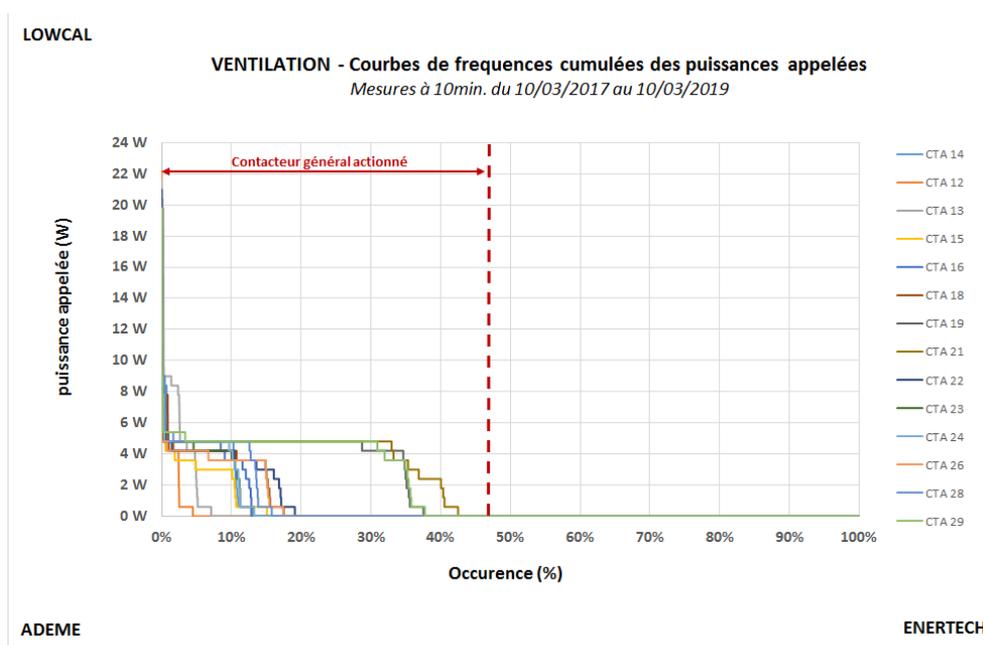


Figure 80 : Courbes de fréquences cumulées des puissances appelées, par les caissons de ventilation.

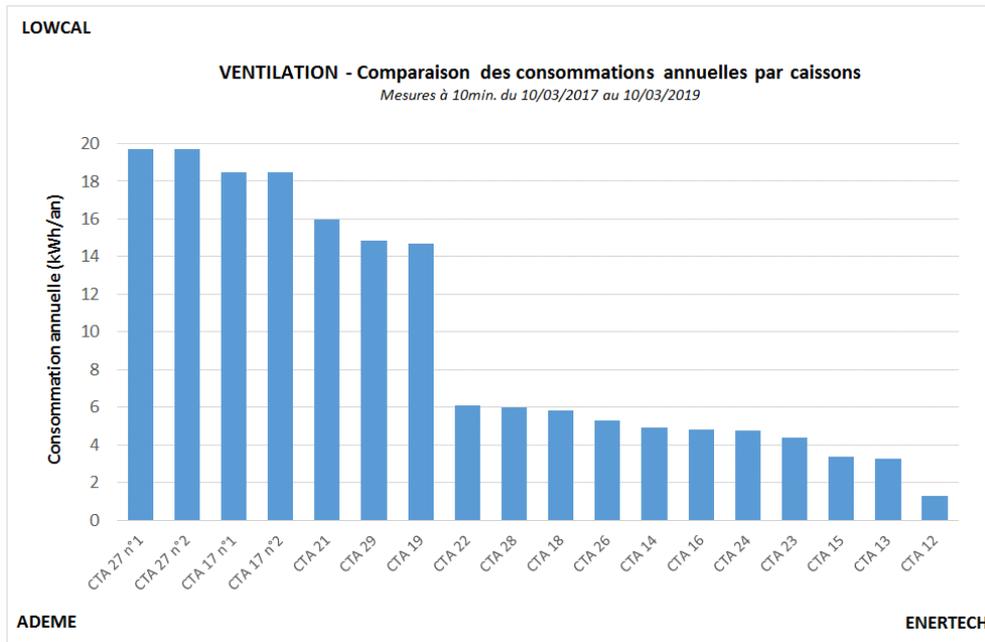


Figure 81 : Comparaison des consommations annuelles par caisson.

4.2.2 SFP, débit et taux de renouvellement d’air

Afin de déterminer le taux de renouvellement d’air dans chaque bureau nous avons effectué des mesures instantanées des débits de soufflage et d’extraction par caisson et pour chaque niveau de consigne (1 à 4) (exemple sur un caisson en Figure 82).

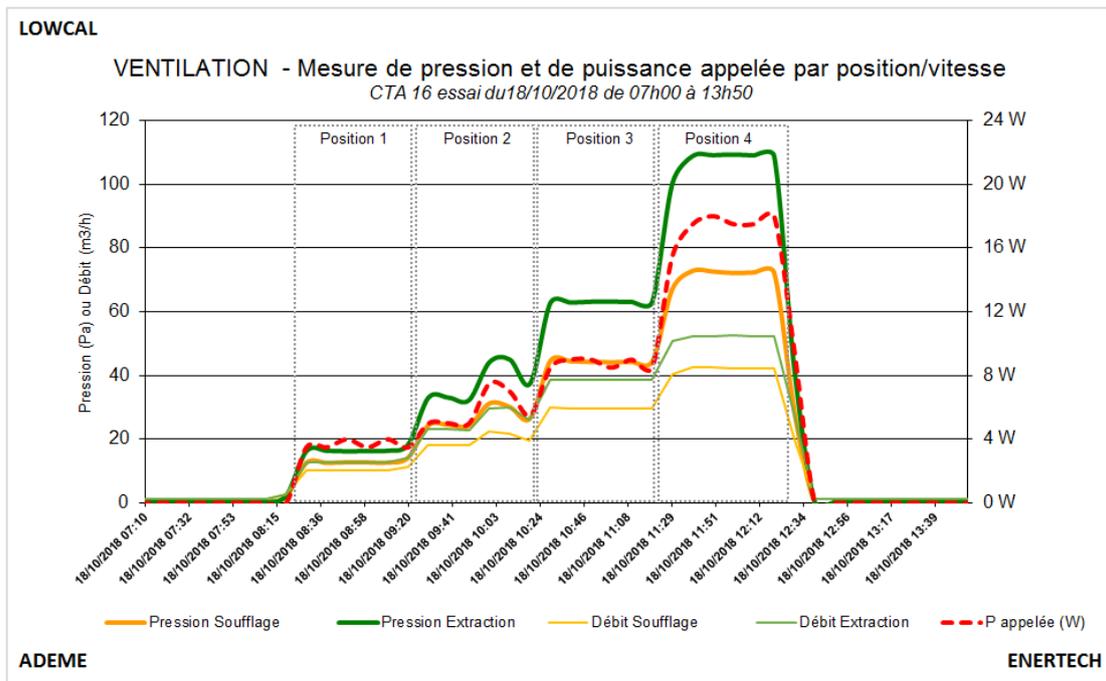


Figure 82 : Pressions, débits et puissances appelées aux différents niveaux de consigne (CTA n°16).

Les correspondances entre puissance moyenne appelée et vitesse de fonctionnement sont présentées dans le Tableau 6. Ces puissances électriques sont très faibles.

Vitesse 1 \approx 3W	Vitesse 3 \approx 8W
Vitesse 2 \approx 5W	Vitesse 4 \approx 18W

Tableau 6 : Correspondances moyennes entre vitesse et puissance appelée (mesure instantanée)

Les mesures électriques et aérauliques permettent de calculer les SFP (Specific Fan Power) des caissons pour chaque vitesse. Nous rappelons ici brièvement la notion de SFP ainsi que les seuils standards associés.

Classe	Puissance électrique par m ³ /s transporté	La norme recommande des ordres de grandeur de puissances spécifiques énergétiquement intéressantes suivant le système installé :		
SFP1	... < 500 W par m ³ /s	Ventilateur d'air soufflé	Application	Valeurs recommandées
SFP2	500 < ... < 750 W par m ³ /s		systeme de climatisation	SFP1
SFP3	750 < ... < 1250 W par m ³ /s	d'air extrait	systeme de ventilation sans récupérateur de chaleur	SFP3
SFP4	1250 < ... < 2000 W par m ³ /s		systeme de climatisation et systeme de ventilation avec récupération de chaleur	SFP3
SFP5	2000 < ... W par m ³ /s		systeme de ventilation sans récupérateur de chaleur	SFP2

Le P_{SFP} ou SFP (Specific Fan Power), coefficient issu de la norme EN 13779, est le rapport entre la puissance absorbée et le débit du ventilateur ou du système de ventilation. Plus le SFP est faible, plus le système est énergétiquement performant.

Le Tableau 7 présente les débits mesurés sur chaque caisson ainsi que le SFP moyen des caissons pour chaque vitesse. Ces résultats montrent qu’il existe des écarts de débits importants d’un caisson à un autre mais également entre le soufflage et l’extraction (par exemple facteur > 2 sur l’extraction en vitesse 4 entre la CTA 19 et la CTA 27 n°2). Plus généralement on observe un sur-débit au soufflage de l’ordre de 20% par rapport à l’extraction.

Bureau	EXTRACTION (m3/h)				SOUFFLAGE (m3/h)			
	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
3	20	28	49	61	18	31	50	70
11	4	13	29	43	15	27	51	77
12	13	22	41	61	14	24	45	67
13	13	22	40	66	16	26	49	74
14	17	29	45	64	17	26	43	60
15	15	25	41	61	18	31	48	67
16	16	27	40	62	18	29	45	63
17 n°1	12	20	41	60	15	25	47	71
17 n°2	10	19	36	56	15	27	49	73
18	13	21	41	61	16	27	50	73
19	7	11	21	31	15	25	46	69
21	10	17	26	37	17	28	45	62
22	12	20	40	56	15	25	48	72
23	10	17	31	50	16	25	48	72
24	17	29	46	60	18	30	47	65
25	14	25	42	58	18	30	47	67
26	11	21	38	58	14	25	47	71
27 n°1	15	23	43	54	17	29	45	64
27 n°2	17	29	46	68	17	25	45	63
28	18	31	47	67	18	29	46	65
29	11	21	34	44	15	26	42	59
Débit moyen (m3/h)	13	22	39	56	16	27	47	68
SFP moyen (W/m3.s-1)	410	402	370	578	334	333	308	478

Tableau 7 : Débits instantanés mesurés sur l’ensemble des caissons et SFP moyens. (SFP à diviser par 2)

Les SFP mesurés sont spectaculairement faibles, globalement deux fois moins élevés que les SFP habituellement rencontrés en double flux collective performante (ce que confirment les classes de SFP mentionnées plus haut).

Les graphiques en Figure 83 et Figure 84 reprennent les débits de soufflage et extraction du Tableau 7. La variabilité des débits apparaît assez importante et peut avoir des causes propres aux machines mais aussi des causes extérieures (gainage du flux sur certains caissons, qui ajoute de la perte de charge). Les débits de reprise des caissons 19, 21, 11 et 29 nous semblent toutefois suffisamment faibles pour que l’on envisage un problème de registre qui ne s’ouvre pas à 100%. Ce point sera vu avec le fabricant.

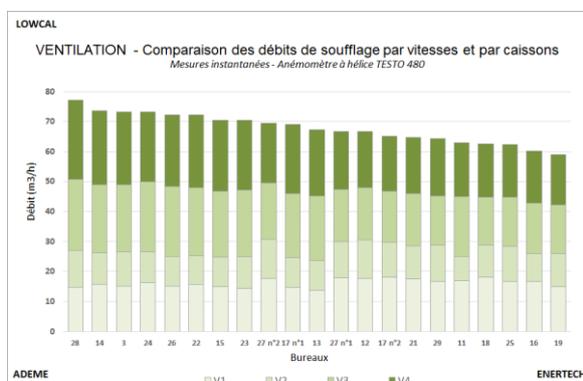


Figure 83 : Comparaison des débits de soufflage par vitesse et par caisson.

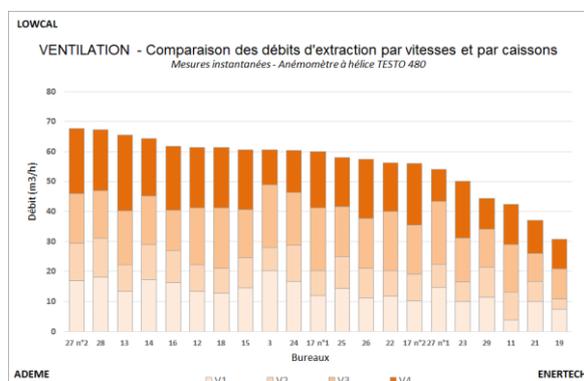


Figure 84: Comparaison des débits d’extraction par vitesse et par caisson.

Taux de renouvellement d’air

Le Tableau 8 fournit les débits moyens de ventilation par bureau en conditions réelles d’utilisation. **Le taux de renouvellement d’air moyen mesuré est de de 0,5 vol/h.** Ce taux de renouvellement d’air correspond globalement à 15 m³/h par poste ce qui est inférieur à la valeur réglementaire de 25 m³/h/pers.

Pour rappel, un rapport de mesures passives et dynamiques de qualité d’air intérieur des bureaux a été réalisé en octobre 2017 par MEDIECO.

Ce rapport notait en conclusion que « *les valeurs se rapportant à la température, l’humidité relative, et la concentration en CO₂ sont satisfaisantes. Les concentrations en COVL et COVG sont plus élevées en l’absence de ventilation et d’occupation qu’en présence d’occupants avec le système de ventilation en fonctionnement (...). Si le renouvellement de l’air des bureaux permet la maîtrise des concentrations en CO₂ en présentiel, celui-ci ne suffit pas à abaisser les concentrations en COVL et COVG accumulées pendant la nuit et surtout les week-ends de manière à obtenir des niveaux de fond satisfaisants selon les indicateurs des balises* »⁷.

	Part fonctionnement	Débit moyen (m3/h)	Taux renouvellement (vol/h)
CTA 12	2,5%	26,1	0,5
CTA 13	5,0%	37,1	0,7
CTA 15	10,5%	18,4	0,4
CTA 16	12,6%	25,1	0,6
CTA 17(x2)	27,2%	55,5	0,6
CTA 18	15,2%	20,4	0,4
CTA 19	35,2%	24,7	0,7
CTA 21	40,1%	21,2	0,6
CTA 22	16,9%	20,2	0,4
CTA 23	11,2%	28,3	0,5
CTA 24	11,1%	29,3	0,6
CTA 26	15,1%	17,3	0,4
CTA 27(x2)	37,1%	46,2	0,5
CTA 28	13,7%	29,8	0,5
CTA 29	35,5%	22,8	0,6

Tableau 8 : Débit moyen et taux de renouvellement d’air par bureau lors du fonctionnement des ventilations.

4.2.3 Concentrations de CO₂

Méthodologie

Le dioxyde de carbone (CO₂) ne constitue pas en soi un polluant détériorant la qualité de l’air mais il est un bon révélateur du taux de renouvellement d’air lorsque des personnes sont présentes dans une pièce. La norme européenne EN 13 779 définit différents niveaux de qualité pour l’air intérieur :

⁷ RAPPORT DE MESURES PASSIVES ET DYNAMIQUES QAI N° QAI-017-10-13 - 16 octobre 2017 – Evaluation de la qualité de l’air intérieur (QAI) à réception & exploitation du siège Enertech (Medieco)

Catégorie	Description	Concentration en CO ₂ : niveau par rapport à l'air neuf (ppm). Intervalle-type
IDA1	Excellente qualité	≤ 400
IDA2	Qualité moyenne	400 - 600
IDA3	Qualité modérée	600 - 1000
IDA4	Faible qualité	> 1000

- Les niveaux donnés dans le tableau ci-dessus sont exprimés en **valeur relative, par rapport au niveau de concentration de l'air extérieur**.

Nous n’avons pas mesuré cette dernière et retiendrons donc comme valeur la moyenne des concentrations les plus faibles observées pendant 1 % de la période de mesure soit 330 ppm.

- Le seuil réglementaire de 1300 ppm (fixé par le règlement sanitaire départemental) correspond approximativement aux zones IDA-1 à IDA-3, et le seuil d’admissibilité de 1000 ppm établi par l’OMS aux zones IDA-1 et IDA-2

- La norme EN 13 779 définit également des niveaux concernant l’air extérieur :

Catégorie	Description	Concentration en CO ₂ : niveau par rapport à l'air neuf (ppm). Intervalle-type
ODA1	Zones rurales sans source de pollution importante	350
ODA2	Petites villes	400
ODA3	Centres urbains	450

La concentration en CO₂ de l’air extérieur de LowCal est évaluée à 340 ppm ce qui le classe en catégorie ODA1, c’est à dire « Zones rurales ». Les seuils limites des différentes catégories IDA1, IDA2 et IDA3 valent dans ce cas respectivement 740 ppm, 940 ppm et 1340 ppm.

Résultats

Cinq bureaux du bâtiment ont été suivis de mars 2017 à février 2018. Le Tableau 9 synthétise l’ensemble des résultats. Les graphiques des Figure 85 et Figure 86 présentent les courbes de fréquences cumulées des concentrations de CO₂ sur toute la période de mesure et aux heures de fonctionnement des CTA.

On peut constater qu’aux heures de fonctionnement des CTA (globalement les heures d’occupation) les niveaux sont excellents de 50 à 70 % du temps, moyens de 20 à 35 % du temps et de qualité modérée, le reste du temps. Ces résultats sont fidèles aux attentes et valident la stratégie de ventilation.

	Bureau 15	Bureau 16	Bureau 17	Bureau 23	Bureau 29
Concentration minimale (ppm)	335	352	333	333	333
Concentration moyenne (ppm)	640	630	608	627	697
Concentration maximales (ppm)	1683	1555	1743	1328	3108
Pourcentage du temps avec une excellent qualité	75%	77%	79%	76%	65%
Pourcentage du temps avec une qualité moyenne	22%	6%	6%	21%	19%
Pourcentage du temps avec une qualité modérée	3%	17%	15%	3%	15%
Pourcentage du temps avec une faible qualité	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 9 : Tableau récapitulatif des concentrations de CO₂ mesurées à LowCal et des niveaux de qualité d’air résultants, sur toute la période de mesure (heures ouvrées et non ouvrées).

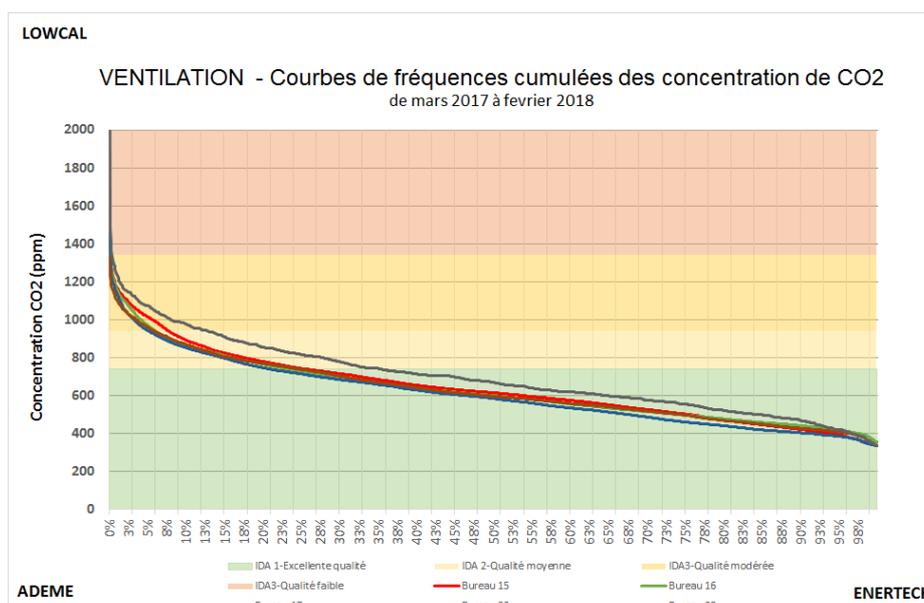


Figure 85 : Courbes de fréquences cumulées des concentrations en CO₂ sur toute la période de mesure.

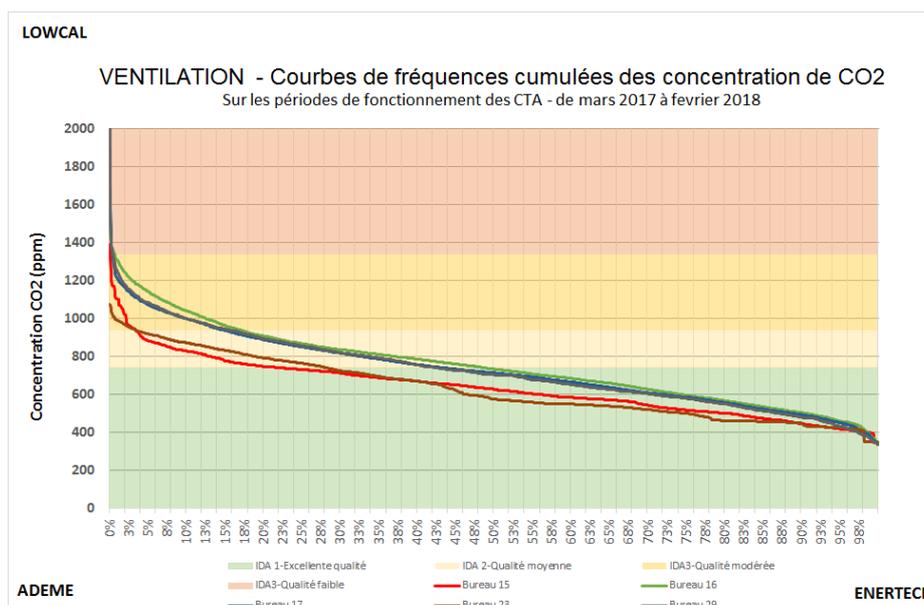


Figure 86 : Courbes de fréquences cumulées des concentrations en CO₂ sur les périodes de fonctionnement des CTA.

Les évolutions temporelles et les courbes de charge moyennes des concentrations de CO₂ sont présentées ci-dessous. Les courbes temporelles montrent que l’intermittence pratiquée sur la ventilation (arrêt en inoccupation) ne permet pas au taux de CO₂ de revenir rapidement à son seuil minimum en période hivernale où les fenêtres restent fermées. Ce phénomène engendre les fluctuations saisonnières du minimum visible sur le graphique.

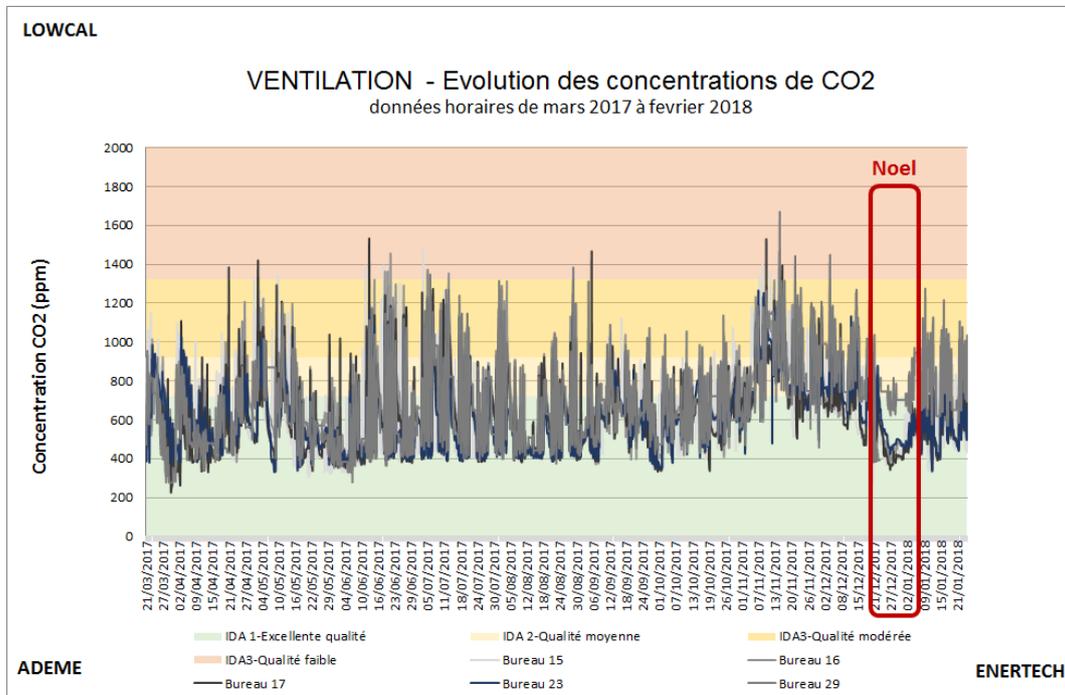


Figure 87 : Evolution temporelle des concentrations en CO₂ sur toute la période de mesure.

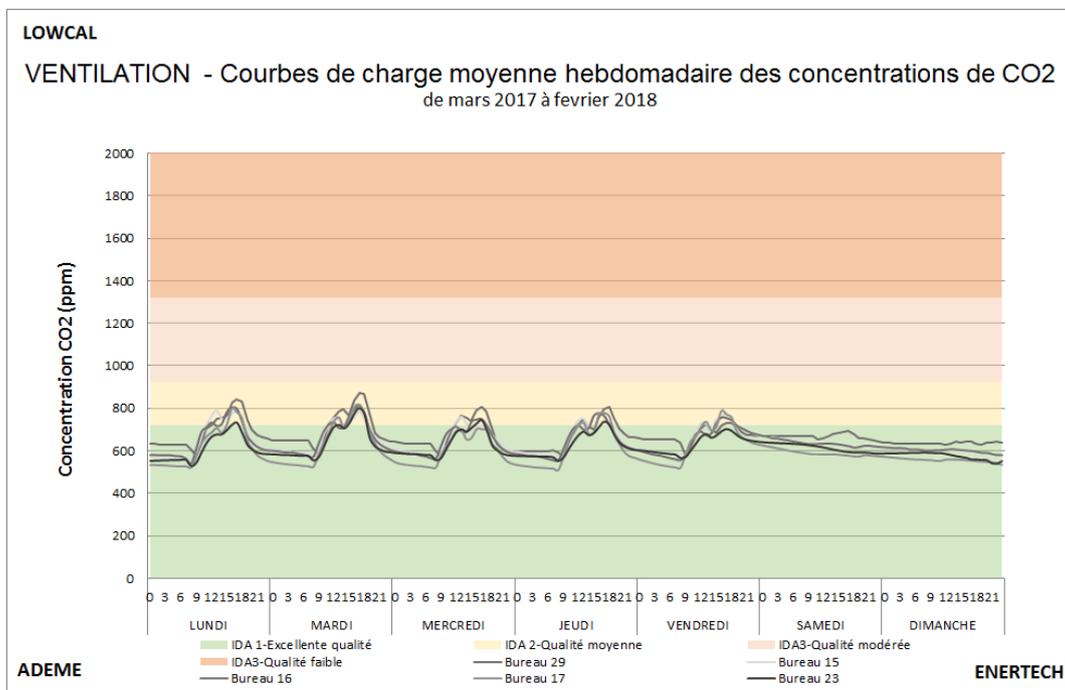


Figure 88 : Courbes de charges hebdomadaires des concentrations en CO₂ sur toute la période de mesure.

4.2.4 Echangeurs enthalpiques

Les échangeurs des CTA double-flux décentralisées du LowCal sont des échangeurs ERV (Enthalpy Recovery Ventilation), permettant une récupération de chaleur et d’humidité. Cette technologie est abordée plus en détail dans le paragraphe 3.4.6.

Les graphiques des Figure 89 et Figure 90 présentent les courbes de fréquences cumulées estivales et hivernales des teneurs en eau des flux d’air aux bornes de l’une des 5 ventilations ayant fait l’objet d’un monitoring avancé.

Les teneurs en eau sont présentées sur la période estivale puis sur la période hivernale, et ce, seulement lorsque la ventilation est en fonctionnement. On voit très clairement l’effet de la récupération enthalpique en hiver avec un air soufflé moins sec que l’air extérieur. Le graphique de la Figure 92 illustre le phénomène de manière temporelle.

L’échange est moins perceptible en été lorsque les teneurs en eau sont équilibrées entre l’intérieur et l’extérieur. Le bénéfice peut même s’inverser comme cela a été vu au chapitre sur le confort d’été, lorsque la teneur en eau intérieure dépasse la teneur extérieure. Dans ce cas (assez marginal cependant) une partie de l’humidité de l’air extrait revient dans le bâtiment ce qui n’est évidemment pas souhaitable.

Période estivale

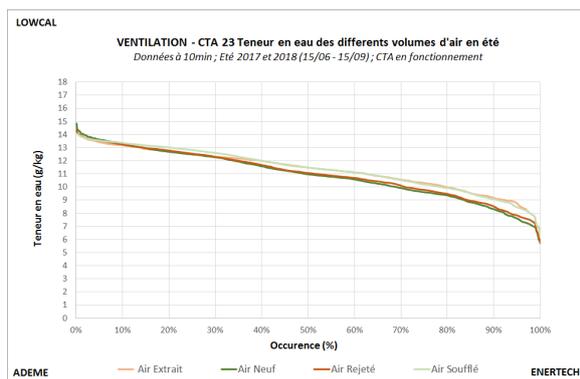


Figure 89 : Fréquences cumulées des teneurs en eau aux bornes de la CTA23 en été.

Période hivernale

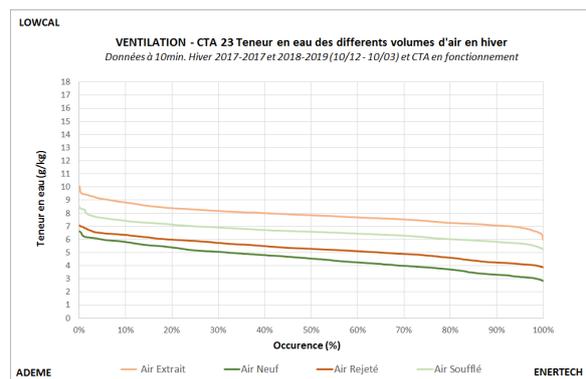


Figure 90 : Fréquences cumulées des teneurs en eau aux bornes de la CTA23 en hiver.

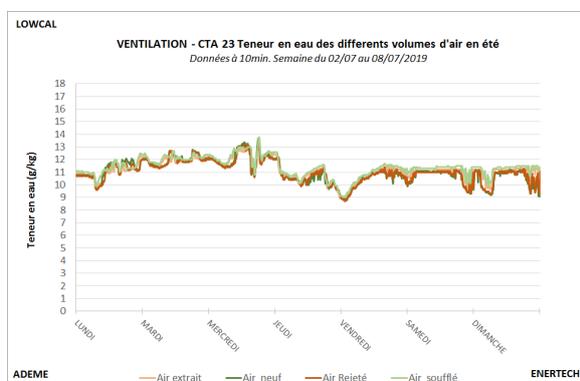


Figure 91 : Evolution des teneurs en eau aux bornes de la CTA23 d’une semaine type en été.

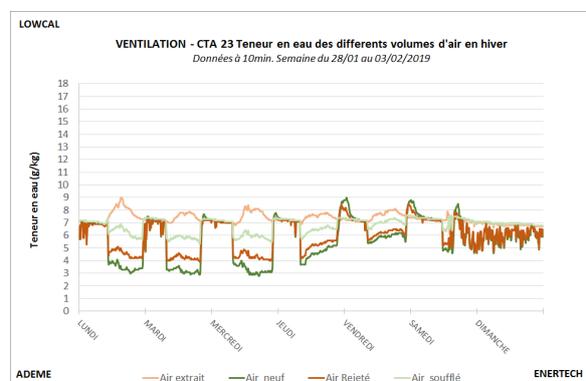


Figure 92 : Evolution des teneurs en eau aux bornes de la CTA23 d’une semaine type en hiver.

4.2.5 Efficacité de la récupération de chaleur

Dans ce paragraphe sont présentées deux méthodes d’évaluation de l’efficacité de récupération de chaleur des échangeurs double flux ComfoAir70 :

- Efficacité sur les températures :

$$\text{Côté air soufflé} = \frac{T^{\circ}\text{C Air Soufflé} - T^{\circ}\text{C Air Neuf}}{T^{\circ}\text{C Air Extrait} - T^{\circ}\text{C Air Neuf}}$$

$$\text{Côté air repris} = \frac{T^{\circ}\text{C Air Extrait} - T^{\circ}\text{C Air Rejeté}}{T^{\circ}\text{C Air Extrait} - T^{\circ}\text{C Air Neuf}}$$

- Efficacité sur l’enthalpie :

$$\text{Côté air soufflé} = \frac{\text{Enthalpie Air Soufflé} - \text{Enthalpie Air Neuf}}{\text{Enthalpie Air Extrait} - \text{Enthalpie Air Neuf}}$$

$$\text{Côté air repris} = \frac{\text{Enthalpie Air Extrait} - \text{Enthalpie Air Rejeté}}{\text{Enthalpie Air Extrait} - \text{Enthalpie Air Neuf}}$$

La méthode de taux effectif de mise à disposition de chaleur (adoptée par le PASSIVHAUS INSTITUT, formule ci-dessous) est plus rigoureuse sur l’approche énergétique mais est moins facile à évaluer par la mesure puisqu’elle fait intervenir le débit d’air.

$$\eta = ((T^{\circ}\text{C Air Extrait} - T^{\circ}\text{C Air Rejeté}) + P \text{ électrique} / m \cdot cp) / (T^{\circ}\text{C Air Extrait} - T^{\circ}\text{C Air Extérieur})$$

avec :

Pel : la puissance électrique des ventilateurs W

m : débit massique en kg/s

cp : capacité calorifique de l’air en J/(kg.K)

Les efficacités (température et enthalpie) mesurées en fonctionnement sur les 5 saisons suivis sont présentées dans le Tableau 10.

		CTA 15	CTA 16	CTA 17	CTA 23	CTA 29
Rapport des températures	<i>Côté Air Soufflé</i>	85,3%	82,6%	71,8%	76,9%	82,5%
	<i>Côté Air Repris</i>		77,3%		89,1%	81,4%
Efficacité de récupération de chaleur	<i>Côté Air Soufflé</i>	82,8%	76,0%	67,0%	73,0%	79,1%
	<i>Côté Air Repris</i>		73,9%		85,4%	76,6%

Tableau 10 : Efficacités mesurées sur les 5 saisons suivis (méthode température et méthode enthalpie).

Ces résultats montrent :

- Une efficacité de récupération moyenne de **80,9%** selon l’approche « température ».
- Une efficacité de récupération moyenne de **76,6%** selon l’approche « enthalpie ».

A noter que pour les CTA 15 et 17, des problèmes de mesure sur les températures (air repris pour la CTA 15 et air rejeté pour la CTA 17) ne nous ont pas permis de calculer les efficacités sur le circuit d’air repris.

Concernant les efficacités sensiblement plus faibles de la CTA 17, on peut noter que celle-ci a fonctionné en vitesse 3 ou 4 tandis que les autres CTA sont plutôt réglées en vitesse 2 ; or nous avons constaté que l’efficacité croît légèrement avec la diminution du débit.

Nous concluons de manière générale que les efficacités de récupération mesurées sont tout à fait satisfaisantes et fidèles aux attentes. Elles contribuent très largement à la minimisation de la charge thermique du poste ventilation dans le bâtiment LowCal.

5 CONCLUSION GENERALE

Le bâtiment LowCal est un bâtiment atypique à plusieurs égards et notamment en raison de la très haute performance de son enveloppe. Le choix de cette performance a permis d’envisager en conception l’absence d’installation de chauffage fixe ainsi que l’absence de climatisation dans une zone géographique pourtant exposée aux fortes chaleurs estivales (zone climatique H2d).

Le respect du confort d’été et du confort d’hiver du bâtiment n’était donc pas acquis en utilisation car ils allaient nécessiter une certaine implication des occupants :

- En hiver maximisation des apports solaires (utilisation des occultations *intérieures* pour se protéger de l’éblouissement), utilisation judicieuse de la ventilation et habillement adapté à une ambiance de 19-20°C ;
- En été utilisation optimale des occultations extérieures pour empêcher les entrées solaires, et ouverture des fenêtres aux heures opportunes pour faire entrer la fraîcheur matinale de manière à décharger la masse.

La campagne de mesures menée dans le bâtiment LowCal entre mars 2017 et mars 2019 a permis d’en valider les choix en montrant un confort thermique très satisfaisant en toutes saisons.

En été

Une utilisation judicieuse des occultations extérieures et des ouvrants a permis de mettre en relief l’avantage estival d’une enveloppe très isolée : **la température moyenne du bâtiment n’a pas dépassé 28°C** (les bureaux les plus chauds ont connu au maximum 6 heures de dépassement). L’écart de température avec l’air extérieur a atteint jusqu’à 10°C sans aucun système actif de rafraîchissement ce qui a étonné un certain nombre de visiteurs.

Les différentes approches standardisées d’évaluation du confort (ASHRAE, COSTIC, NF 7730, NF 15251) indiquent par ailleurs :

- Que les « dépassements hauts » (ASHRAE, COSTIC) du confort estival dans LowCal sont dus à l’humidité plus qu’à la température ambiante. Or l’humidité intérieure du bâtiment est essentiellement dépendante de la météo comme montré au §3.4.6. Supprimer ces points hauts nécessiterait un système actif de déshumidification. La récupération d’humidité des échangeurs enthalpiques des CTA joue un rôle sans doute non nul dans ce résultat mais plutôt négligeable *a priori*, tandis que cette récupération hydrique est très favorable en hiver. Les murs de refend en terre crue représentent, quant à eux, un atout certain dans la maîtrise de l’hygrométrie.
- Que les « dépassements bas » constatés (NF 7730, NF 15251) sont liés à des températures basses qui sont la conséquence d’un rafraîchissement matinal volontaire par ouverture des fenêtres, permettant d’accélérer la décharge de la masse du bâtiment. Ces points bas ne constituent pas un inconfort réel selon les occupants.

Le confort d’été est donc fidèle aux attentes. Il n’est toutefois pas exclu de recourir un jour à des brasseurs d’air pour passer plus confortablement les très gros pics de chaleur.

En hiver

Le bâtiment, quasiment entièrement chauffé par le soleil⁸, a offert une **température ambiante moyenne en décembre-janvier-février de 20.3°C** (min 17.2°C, max 24.7°C) avec une température extérieure qui est descendue jusqu’à -8,7°C. Les valeurs les plus basses des températures ambiantes sont le reflet :

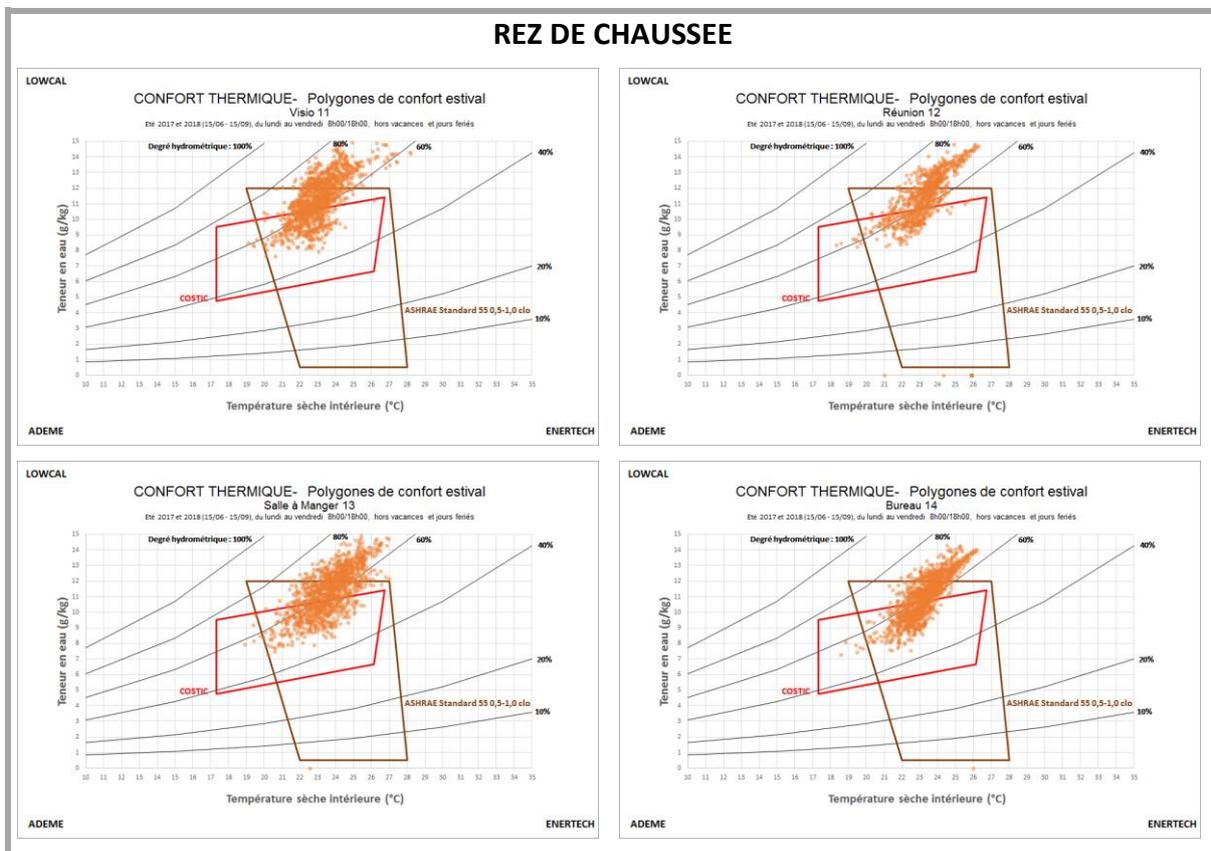
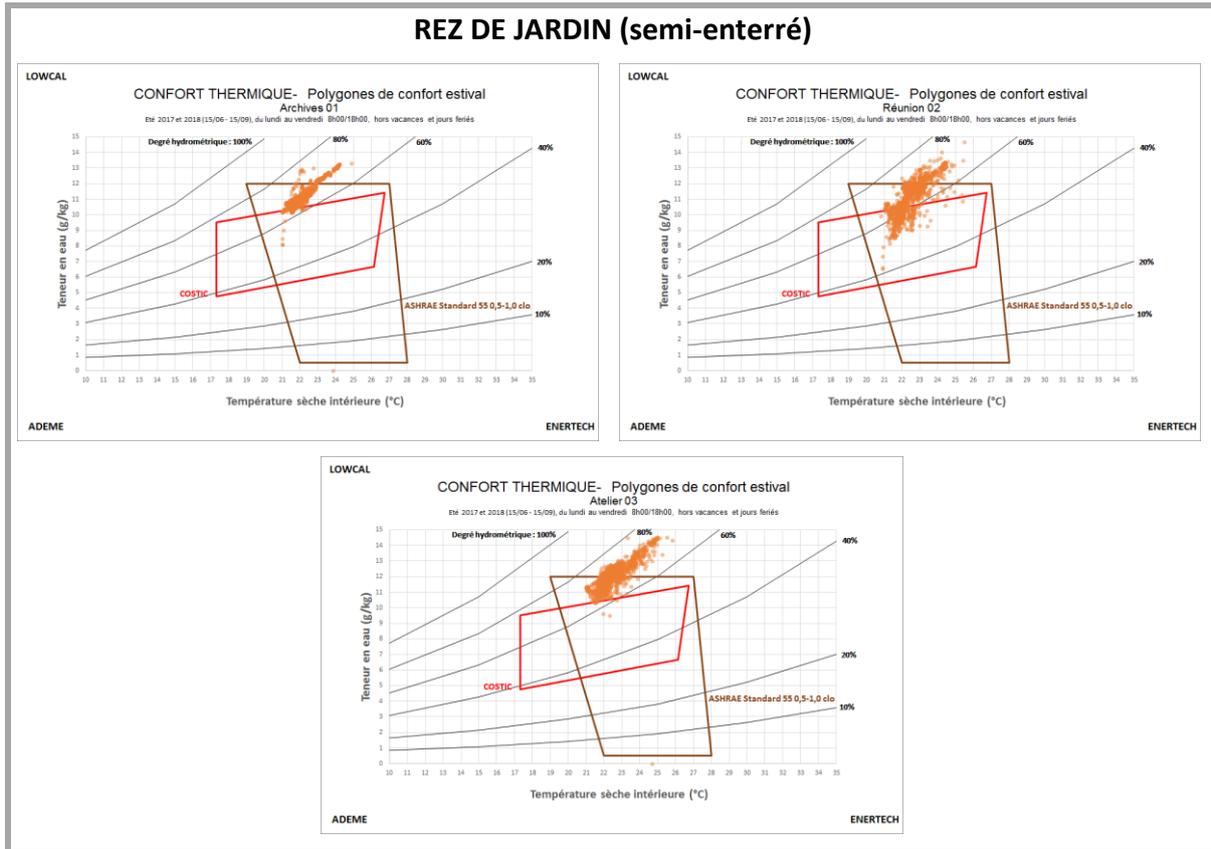
- D’une pratique dans certains bureaux consistant à ouvrir brièvement les fenêtres le matin de manière à évacuer les polluants accumulés pendant la nuit du fait de l’arrêt des ventilations (suite à une préconisation de MEDIECO) ;
- D’un apprentissage progressif de la meilleure manière de gérer l’appoint de chauffage, qui est désormais asservi à une sonde de température intégrée dans la masse avec une consigne de 20°C.

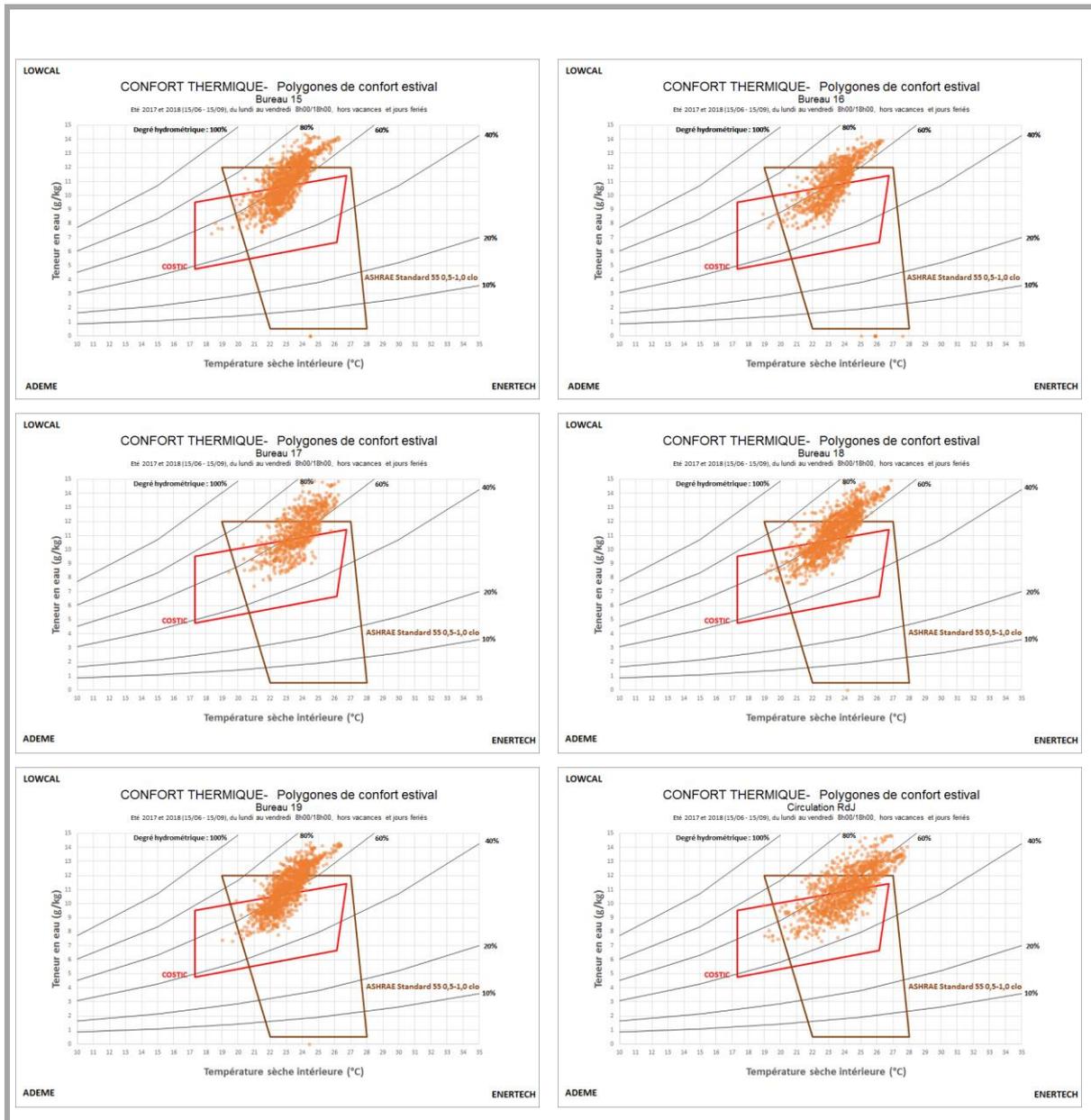
Il faut noter ici que l’absence totale de parois froides, de ponts thermiques, d’infiltrations d’air, associée à l’ambiance chaleureuse des locaux (terre crue, bois, couleurs vives, chauffage par le soleil) permet très clairement un certain abaissement de la température ambiante sans que l’on en ressente d’inconfort. Un habillement suffisant (tenue hivernale classique soit Clo autour de 1.5) est bien entendu pratiqué par l’ensemble des occupants en cohérence avec la démarche générale du projet LowCal.

Notons enfin que les ventilations double-flux décentralisées utilisées à LowCal disposent d’échangeurs enthalpiques ERV (Enthalpy Recovery Ventilation) qui récupèrent une part importante de l’humidité de l’air extrait pour la réinjecter dans l’air soufflé. Ce dispositif permet d’éviter l’assèchement de l’air intérieur provoqué en hiver par les ventilations classiques. Il contribue très clairement à l’amélioration du confort intérieur en hiver (ce que soulignent les mesures d’ambiance projetées sur le polygone de confort du COSTIC).

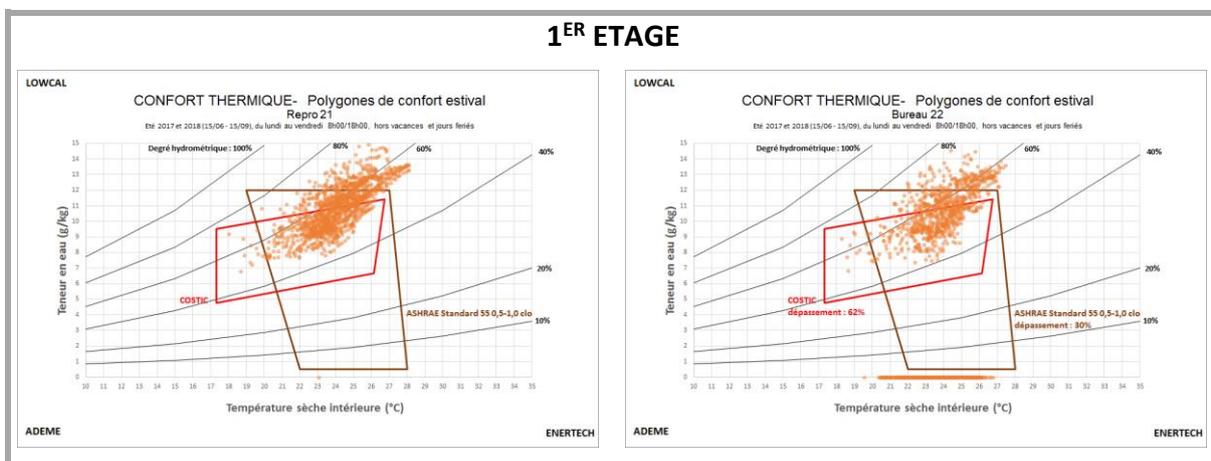
⁸ L’appoint de chauffage électrique a consommé en moyenne **3kWh_{él}/m²/an** sur les 2 années de mesure.

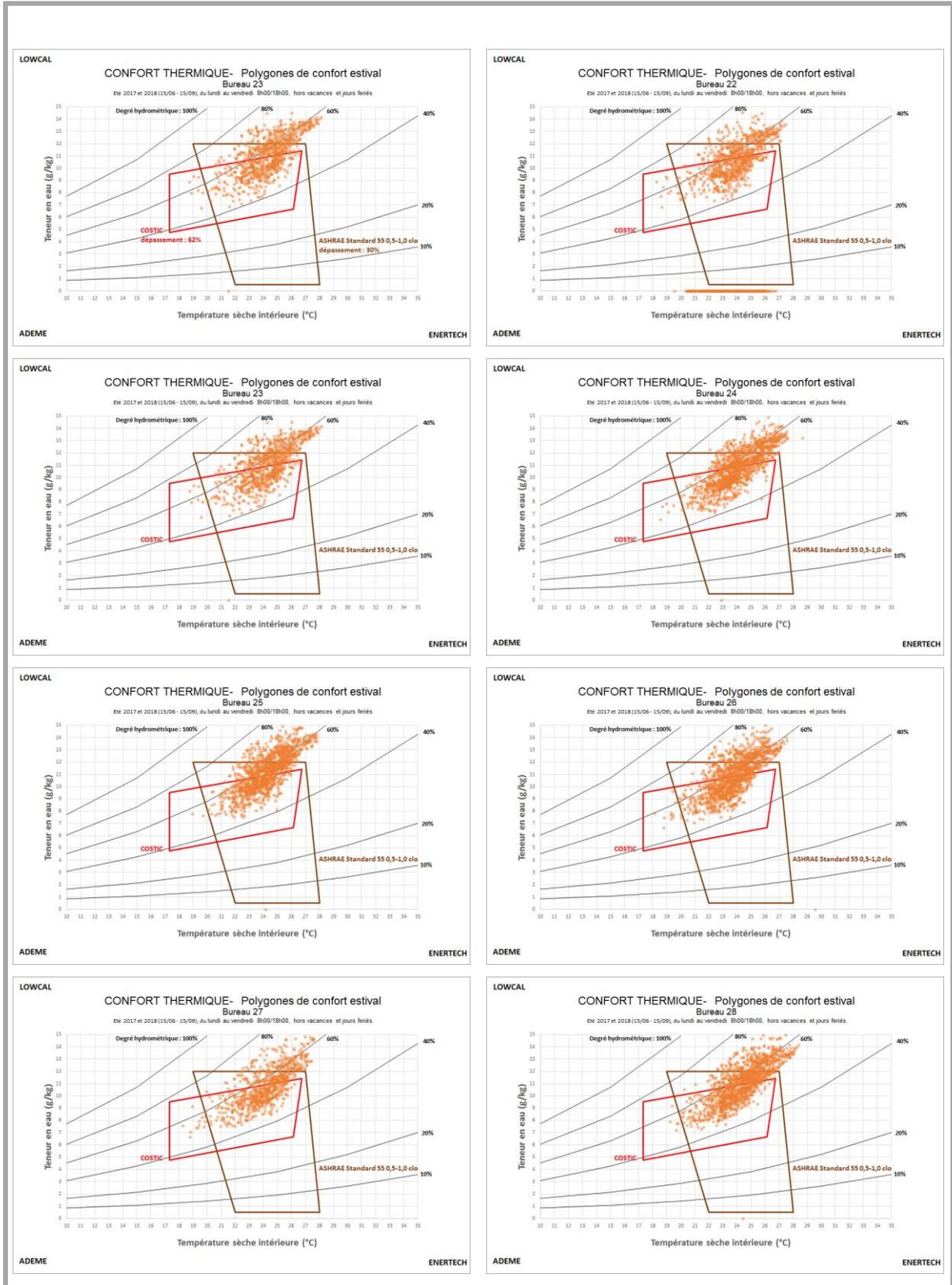
6 ANNEXE 1 : Polygones de confort par locaux



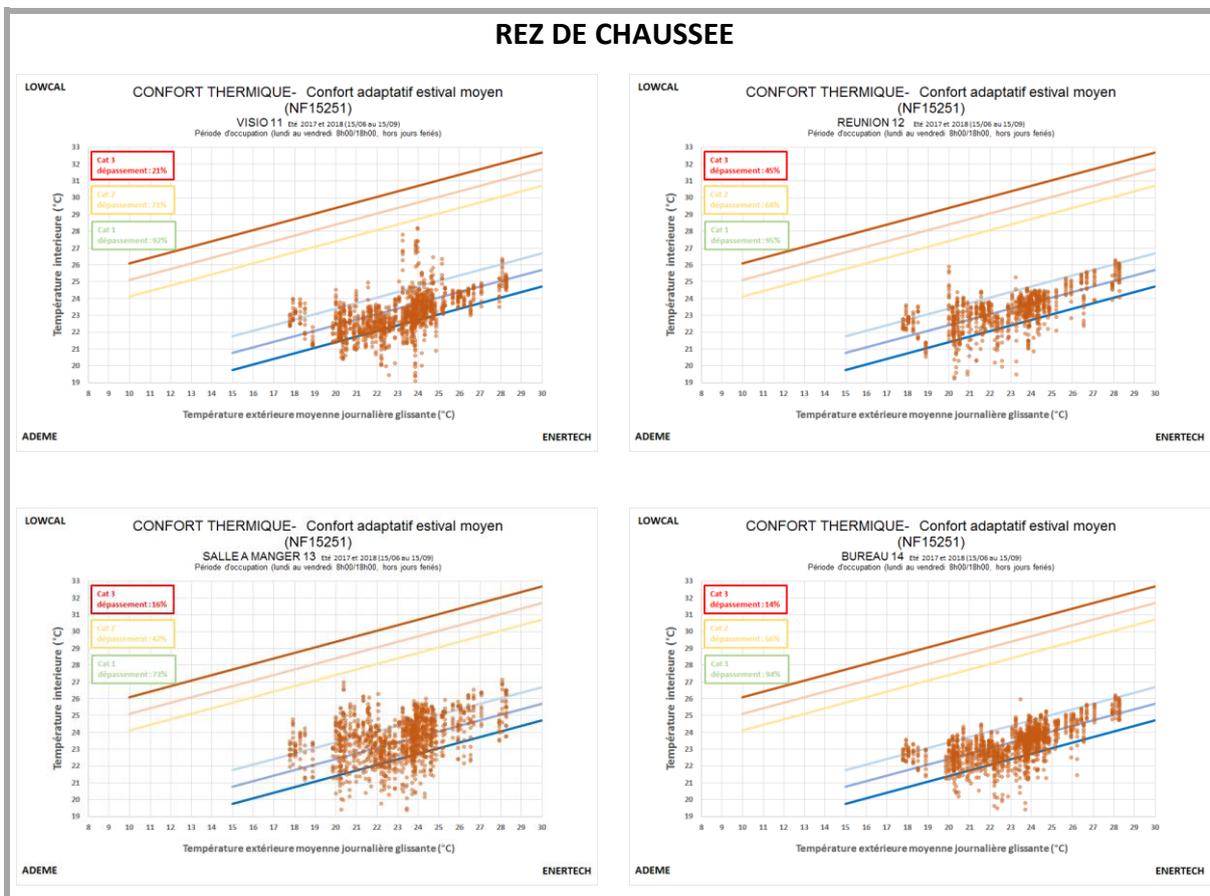
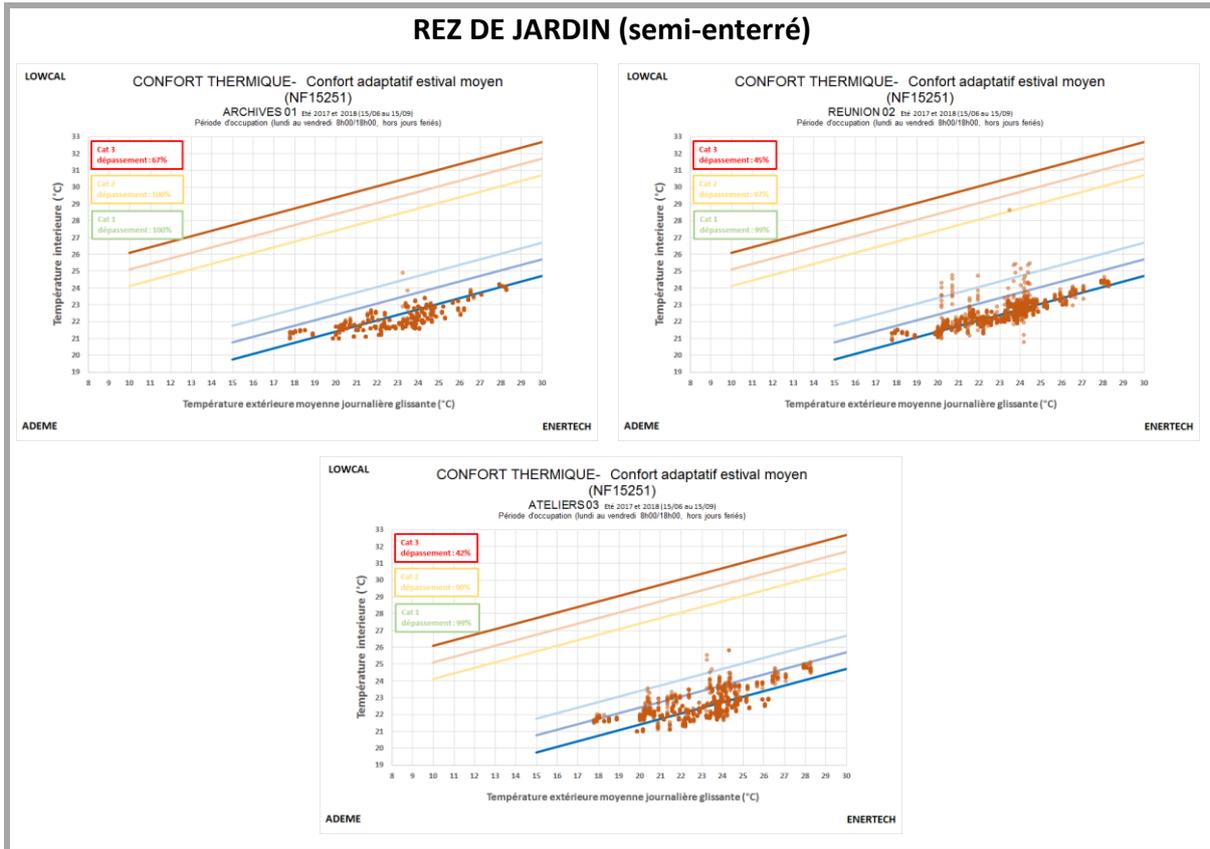


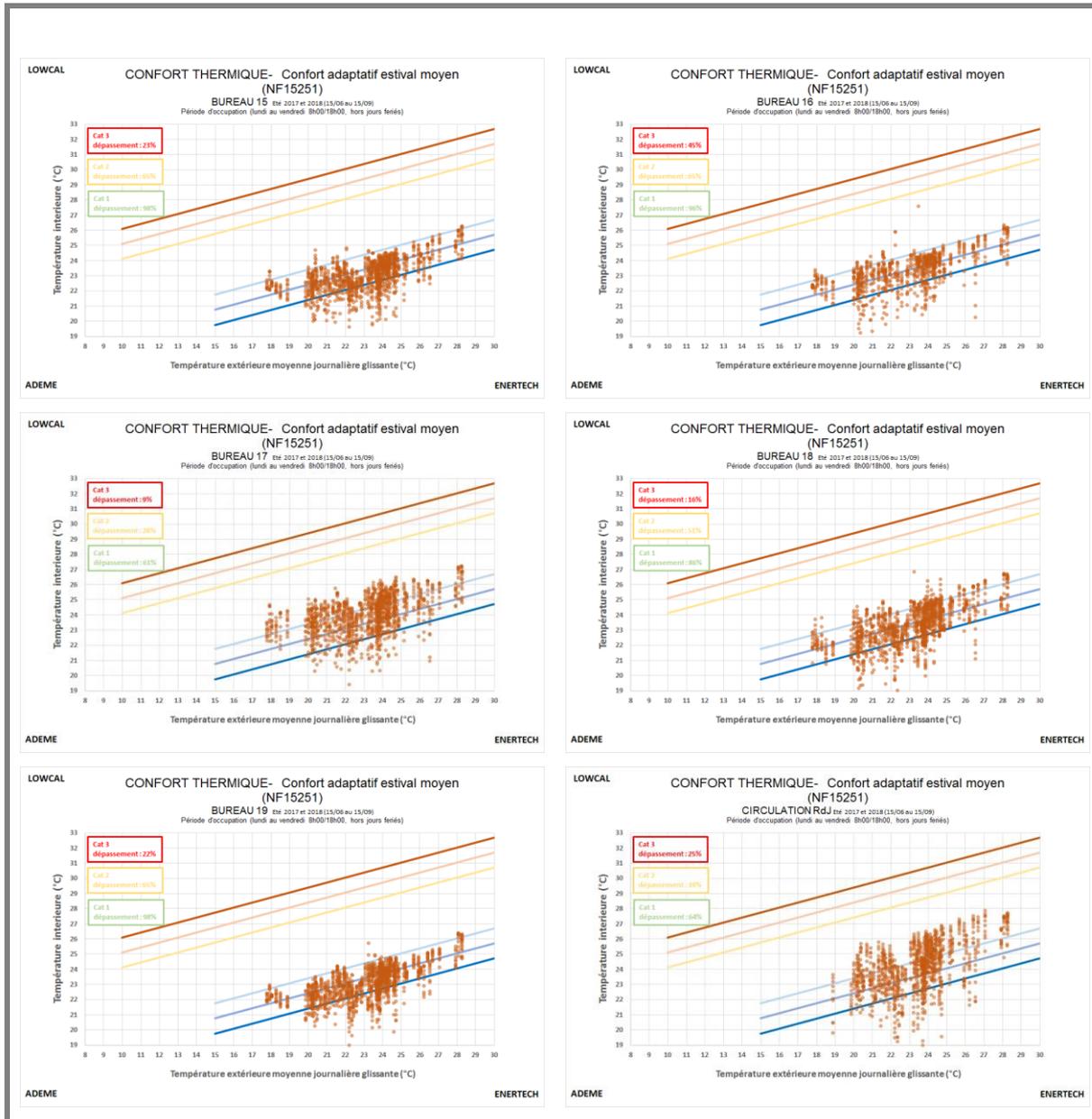
1ER ETAGE



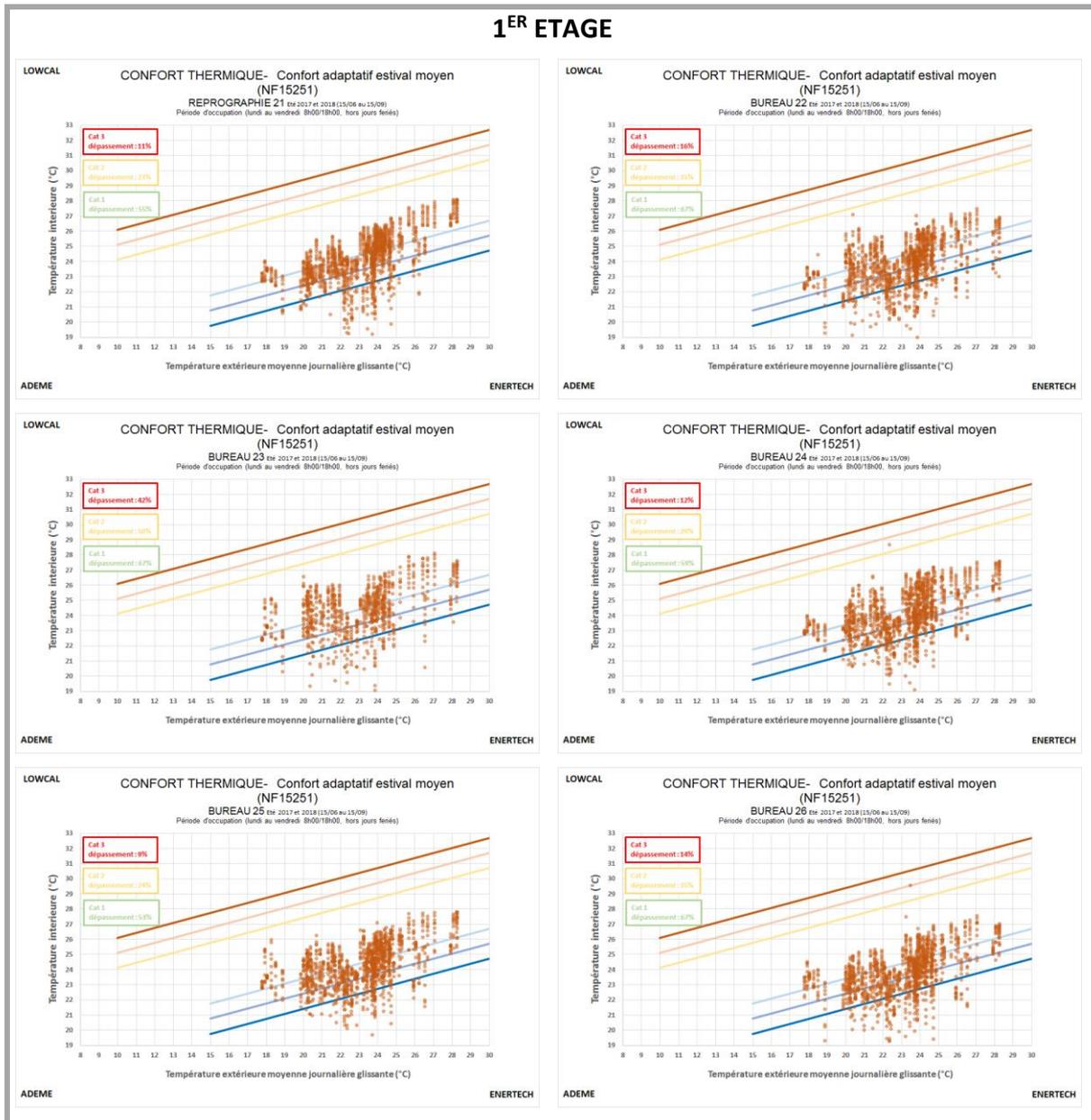


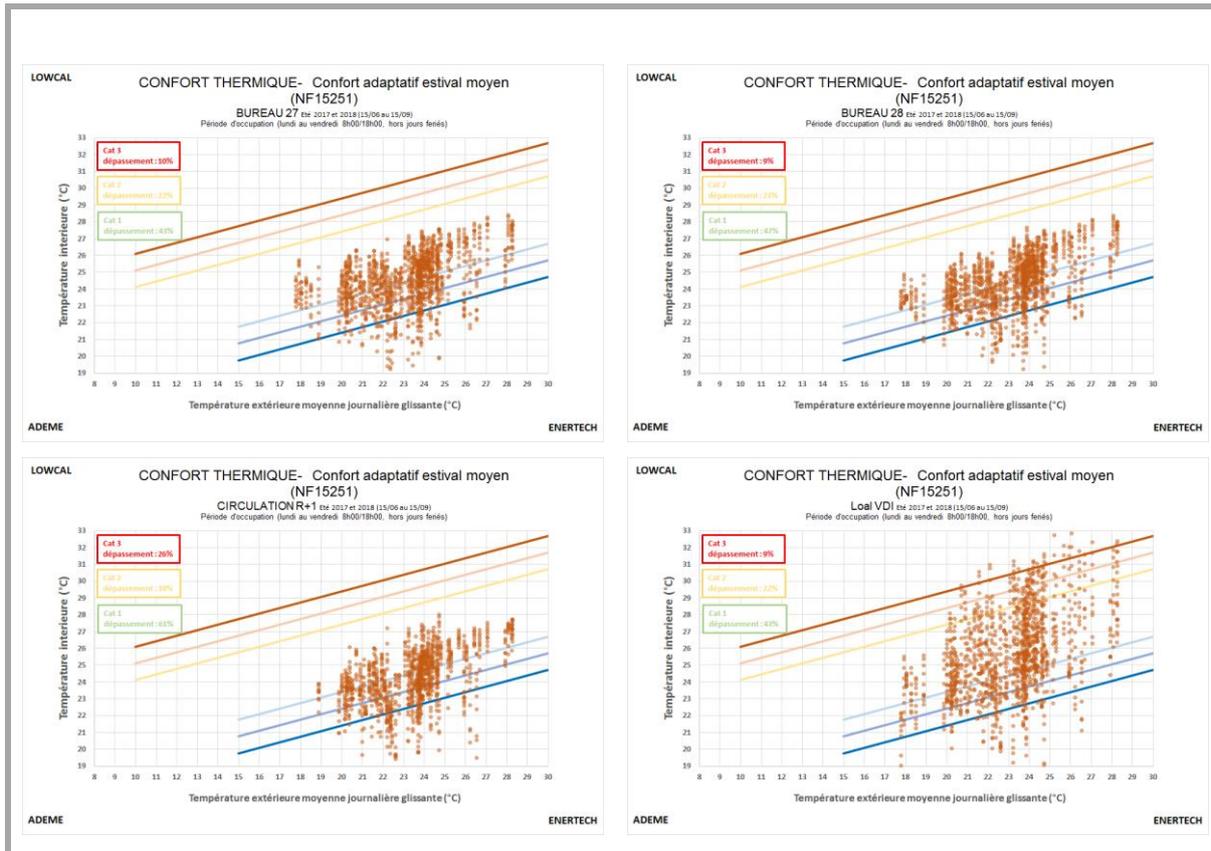
7 ANNEXE 2 : Confort adaptatif NF15251 par locaux





1^{ER} ETAGE





8 ANNEXE 3 : Teneurs en eau par CTA

