

Projet : LowCal, étude du premier bâtiment à énergie grise positive de France pour massifier la réalisation, à coût maîtrisé, du bâtiment low-tech, local et sans calorie.

Sous-tâche 1.2 : Analyse des performances réelles par campagne de mesures.

Etude réalisée pour le compte de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) par ENERTECH



Coordination technique ADEME:

Romuald CAUMONT

romuald.caumont@ademe.fr

01.47.65.21.49

Version	Rédigé par	Relu par	Date
1	JS	MG,NA,SM,PC	09/07/2020

Table des matières

1	Synthèse de l'étude.....	5
1.1	Contexte.....	5
1.2	Résultats globaux.....	6
2	Rappels sur le bâtiment et ses installations	7
3	Métrologie mise en place	8
3.1	Généralités sur les usages suivis.....	8
3.2	Description des capteurs.....	8
3.2.1	Système Multivoies.....	8
3.2.2	Wattmètre Série	9
3.2.3	Lampemètre.....	9
3.3	Illustration détaillée de la pose.....	9
3.3.1	TGBT du bâtiment.....	9
3.3.2	Tableaux de dérivation (CTA)	10
3.3.3	Eclairage.....	11
3.3.4	Equipements informatiques et autres appareils électriques	11
3.3.5	Production solaire.....	12
3.3.6	Débits de ventilation.....	13
4	Résultats de mesure.....	14
4.1	Consommation générale.....	14
4.1.1	Répartition des consommations par usage.....	14
4.1.2	Evolutions annuelles et mensuelles des consommations.	16
4.1.3	Puissances appelées – fréquences cumulées et courbes de charge	18
4.1.4	Comparaison de la mesure avec les calculs faits en conception.....	21
4.1.5	Comparaison des consommations de LowCal avec d'autres bâtiments	22
4.2	Chauffage.....	22
4.2.1	Description de l'installation	22
4.2.2	Consommation mesurée	23
4.2.3	Profil de fonctionnement	23
4.3	Bureautique	26
4.3.1	Description de l'installation.....	26

4.3.2	Consommation mesurée	26
4.3.3	Répartition des consommations par équipement.....	28
4.3.4	Profil de fonctionnement	29
4.3.5	Evolution de la consommation mensuelle	30
4.4	<i>Eclairage</i>	31
4.4.1	Description de l'installation.....	31
4.4.2	Consommation mesurée	32
4.4.3	Profil de fonctionnement	33
4.4.4	Evolution des consommations mensuelles	34
4.4.5	Répartition de la consommation vue du TGBT.....	34
4.4.6	Répartition de la consommation par pièce	35
4.5	<i>Eau Chaude Sanitaire</i>	37
4.5.1	Description de l'installation.....	37
4.5.2	Consommation mesurée	38
4.5.3	Profil de fonctionnement	38
4.5.4	Evolution des consommations mensuelles	39
4.6	<i>Cuisine-réfectoire</i>	39
4.7	<i>Ventilation</i>	41
4.7.1	Description de l'installation.....	41
4.7.2	Consommation mesurée	42
4.7.3	Profils de fonctionnement.....	43
4.7.4	Répartition des consommations (vues du TGBT)	43
4.7.5	Consommations et puissances appelées.....	44
4.7.6	Débits et taux de renouvellement d'air.....	45
4.8	<i>Production photovoltaïque</i>	48
4.8.1	Bilan brut de la production	48
4.8.2	Autoproduction et autoconsommation.....	50
4.8.3	Lien avec la mobilité électrique.....	51
5	ANNEXE 1 : Mesure des performances d'une jaquette isolante pour chauffe-eau individuel.....	54
5.1	<i>Objectif du test</i>	54
5.2	<i>Installation et métrologie</i>	54
5.2.1	Le chauffe-eau	54

5.2.2	La jaquette isolante	55
5.2.3	Protocole de mesure	56
5.3	<i>Résultats</i>	58
5.3.1	Résultats bruts	58
5.3.2	Résultats extrapolés à des chauffe-eaux de 200 L et 300 L.....	59
5.4	<i>Conclusion</i>	60
6	ANNEXE 2 : Mesure des performances d'un système de production ECS instantanée avec récupération de chaleur.....	61
6.1	<i>Objectif du test</i>	61
6.2	<i>Installation et métrologie</i>	61
6.3	<i>Résultats</i>	63
6.1	<i>Conclusion</i>	64

1 Synthèse de l'étude

1.1 Contexte

De nombreux bâtiments en France affichent ou ont affiché un objectif à « énergie positive » (BEPOS). Il y a quelques années l'application concrète de cette ambition sur le terrain était très disparate¹, avec une part très importante de bâtiments à énergie positive seulement sur les 5 usages réglementaires et une vérification des performances par la mesure rarement effectuée¹.

L'apparition des labels BEPOS Effinergie (2013 puis 2017) et E+C- permettent aujourd'hui de rationaliser l'approche et d'homogénéiser les exigences tout en anticipant la future réglementation thermique (RE2020). Toutefois les bâtiments qui parviennent à ces niveaux de performance sont encore très rares puisque nous recensons en août 2019 : 8 bâtiments certifiés BEPOS Effinergie 2017², 2 bâtiments certifiés BEPOS+ Effinergie 2017², et 8 bâtiments de niveau E⁴ sans que l'on sache s'ils sont réellement certifiés³.

Le bâtiment LowCal, siège d'ENERTECH, est occupé depuis août 2016 et a été conçu en 2012-2014 avant l'apparition des labels évoqués ci-dessus. Ce bâtiment visait à démontrer qu'il était possible de concevoir un bâtiment « low-tech » à énergie grise positive à un coût maîtrisé en utilisant les compétences d'entreprises locales. Aujourd'hui le bâtiment est labellisé BEPOS+ Effinergie 2017, BBCA niveau excellence et Energie Carbone niveau E4C2 (seul bâtiment calculé à ce jour à ce niveau par E+C-). Une certification Passivhaus est en cours.

A travers le présent APR, l'ADEME cherche à étudier ce bâtiment innovant sous différents aspects comme le confort, la performance énergétique et environnementale, le coût global et la répliquabilité à l'échelle nationale.

Le présent rapport traite de la sous-tâche 1.2 : vérification des performances réelles par campagne de mesures. L'objectif global est de quantifier, par une campagne de mesures détaillée de 24 mois portant sur l'ensemble des usages, la performance énergétique réelle du bâtiment en consommation et en production. Nous nous attacherons, à travers cette campagne, à déterminer précisément la répartition des consommations par usage et à en étudier les taux d'autoproduction et autoconsommation photovoltaïque. Une étude prospective sur la mobilité électrique en lien avec l'énergie excédentaire produite est également proposée en fin de rapport.

La campagne de mesures a couvert deux saisons de chauffe (2017/2018 et 2018/2019) ainsi que deux étés complets (voir Figure 1).

NB : le confort thermique du bâtiment est traité dans le rendu relatif à la sous-tâche 2.1 « Confort thermique d'été et d'hiver » de cet APR.

¹ Source : *Etude de bâtiments affichant un objectif « énergie positive », « zéro énergie », « zéro carbone », mise en place d'une base de données en ligne, étude statistique et retours de terrains*, ENERTECH pour l'ADEME, 2014

² Source : www.observatoirebbc.org

³ Source : www.batiment-energiecarbone.fr

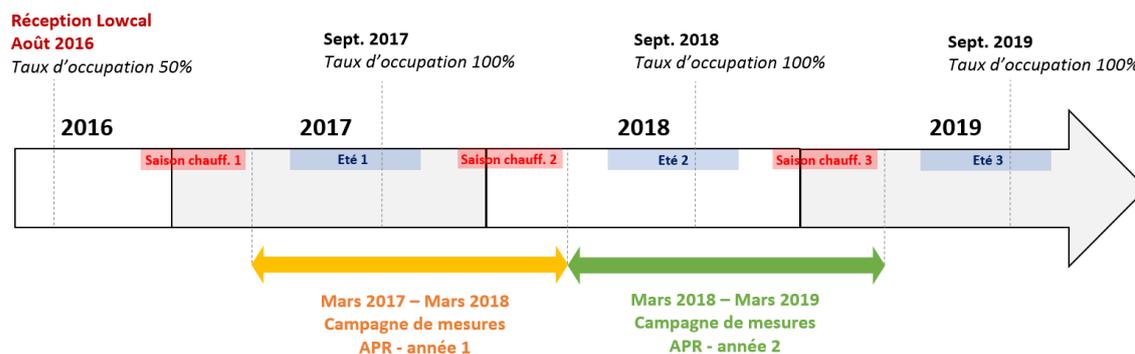


Figure 1 : Calendrier de la campagne de mesures de 24 mois portant sur le bâtiment LowCal.

1.2 Résultats globaux

Les consommations moyennes du bâtiment sont exceptionnellement faibles au regard des consommations connues sur d'autres bâtiments du même usage, non seulement sur le chauffage (quasiment nul avec $2,8 \text{ kWh}_{\text{él}}/\text{m}^2_{\text{shon}}/\text{an}$) mais aussi sur l'ensemble des autres usages électriques ($4,2 \text{ kWh}_{\text{él}}/\text{m}^2_{\text{shon}}/\text{an}$).

Les résultats des mesures sont résumés dans le Tableau 1.

LOWCAL		
Résultats de la campagne de mesures de 2 ans (mars 2017 à mars 2019)		
Poste	Consommation moyenne annuelle	
	$\text{kWh}_{\text{él}}/\text{an}$	$\text{kWh}_{\text{él}}/\text{m}^2_{\text{shon}}/\text{an}$
Chauffage d'appoint	2 034	2.8
Bureautique	1 789	2.5
Eclairage	477	0.7
Cuisine	327	0.4
Eau chaude sanitaire	271	0.4
Ventilation	195	0.3
Divers	32	0.04
Total	5 124	7.0
Production photovoltaïque :		
Installation 23,7 kWc	32 900	45
Bilan énergie positive tous usages :		
Consommation 6,4 fois inférieure à la production		

Tableau 1 : Résultats des mesures sur le bâtiment de bureaux LowCal (SU 620 m², S_{shon} 730 m²).

La consommation d'énergie du bâtiment LowCal est donc fidèle à celle prévue en conception, tant sur le plan de la thermique que sur celui de la maîtrise de la demande d'électricité. Le bâtiment produit ainsi 6 fois plus d'énergie qu'il n'en consomme. Il constitue une référence absolue en matière de performance énergétique.

2 Rappels sur le bâtiment et ses installations

Le bâtiment LowCal est décrit en détail dans la plaquette de présentation qui a fait l'objet du rendu de la sous-tâche 1.1 « Description du bâtiment ». Nous rappelons brièvement les principales caractéristiques du bâtiment et de ses installations :

- **Généralité** : LowCal est un bâtiment de bureaux qui comporte 3 niveaux (rez-de-jardin, rez-de-chaussée et R+1) et dispose d'une surface de 730 m² SHON pour 620 m² de surface utile (SU) et 626 m² de surface de plancher (SDP). Le bâtiment comporte 35 postes de travail. Il est occupé depuis mi-août 2016. Le taux d'occupation du bâtiment est proche de 100 % depuis septembre 2017.
- **Bâti** : Murs courants en ossature-bois / paille avec ITI laine de bois ($U = 0,13 \text{ W/m}^2.K$), murs RdJ en béton avec ITI laine de bois et ITE en PSE graphité ($U = 0,13 \text{ W/m}^2.K$), dalle basse en béton sur terre-plein avec rupture thermique périphérique et ITE en PSE ($U = 0,13 \text{ W/m}^2.K$), dalle haute semi-lourde en terre sèche avec ouate de cellulose insufflée ($U = 0,10 \text{ W/m}^2.K$) ; fenêtres bois triple vitrage ($U_w = 0,91 \text{ W/m}^2.K$) avec BSO motorisé au sud et volets bois sur les autres façade ; apport d'inertie supplémentaire avec refends en briques de terre crue et remplissage des planchers hauts RDC et R+1 en brique de terre sèche et argile (total de 100 tonnes de terre dans le bâtiment ayant nécessité une ossature bois renforcée).
- **Chauffage d'appoint** : 4 convecteurs électriques disposés dans le couloir du RDC.
- **Eau-chaude sanitaire** : cumulus électrique classique. Tests en cours sur un chauffe-eau électrique instantané avec récupération de chaleur pour remplacer le cumulus électrique.
- **Ventilation** : ventilation double-flux décentralisée par bureau avec commande locale par interrupteur. Prise et rejet d'air en façade. Une centrale double flux classique pour la grande salle de réunion du RDJ.
- **Eclairage** : éclairage LED à commande manuelle. Puissance installée inférieure à 2 W/m². 3 lampes de bureau.
- **Bureautique et serveurs** : 25 ordinateurs portables (avec écran d'appoint sur environ un tiers des postes), 1 poste fixe, 3 imprimantes de bureau, 1 traceur, 30 téléphones numériques sur autocom, 1 serveur de fichier, 1 serveur mail très basse consommation, 1 serveur de calcul (installé le 7 janvier 2019 en fin de campagne), 1 routeur, 2 box ADSL, des switchs, 1 alimentation sans interruption (onduleur) qui dessert l'ensemble des équipements de la téléphonie et du réseau informatique excepté le serveur de calcul.
- **Cuisine-réfectoire** : 2 fours micro-onde, 1 cafetière filtre, 1 bouilloire.
- **Sécurité** : un système d'alarme incendie et anti-intrusion.
- **Photovoltaïque** : installation de 153 m² de capteurs pour 24 kW_c, en vente totale.

3 Métrologie mise en place

3.1 Généralités sur les usages suivis

Chaque usage électrique a été instrumenté au pas de temps de 10 minutes pendant 24 mois :

- Chauffage d'appoint,
- Eau chaude sanitaire,
- Ventilation,
- Eclairages plafonniers et lampes de bureaux,
- Postes informatiques terminaux,
- Equipements informatiques et de communication mutualisés (serveurs, routeurs, autocom, switch etc.),
- Equipements du réfectoire (bouilloire, machine à café, fours micro-ondes),
- Brise-soleil orientables motorisés,
- Alarme incendie et anti intrusion.

Ce suivi énergétique totalise **166 voies de mesures** (64 voies en tableau électrique, 77 wattmètres série et 25 lampemètres) ce qui représente environ 17,5 millions de données sur la période de mesure de 24 mois.

NB : L'ambiance intérieure pièce par pièce ainsi que la météo du site ont également fait l'objet d'un suivi à 10 minutes. Ce dernier est dans la sous-tâche 2.1 dédiée à l'étude du confort thermique dans le bâtiment.

3.2 Description des capteurs

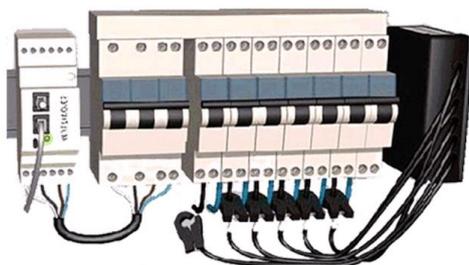
3.2.1 Système Multivoies

Le système Multivoies assure la mesure de la puissance active d'usages électriques dans les tableaux électriques.

Il se compose de plusieurs éléments :

- Un concentrateur qui permet d'effectuer une seule prise de tension.
- Des modules équipés de 6 pinces ampèremétriques.

Sa mémoire interne est de 4,5 mois.

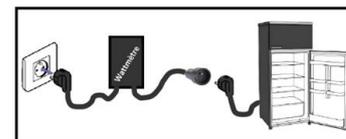


Caractéristiques

Type de capteur	Transformateur d'intensité
Précision	2%
Alimentation	Secteur (consommation <2W)
Fréquence d'acquisition	< 1seconde
Pas de temps de stockage	De 1 s à 1 heure
Communication	Filaire
Dimensions	Concentrateur : Rail Din 2 mod. Module : 85 x 56 x 25mm

3.2.2 Wattmètre Série

Le Wattmètre série se place en série sur n'importe quel usage raccordé sur une prise de courant. Pour cela il dispose de prises mâle et femelle 16A. Il mesure l'énergie consommée au pas de temps de 10 minutes. Il dispose d'une mémoire permettant d'enregistrer les données pendant plus d'une année.



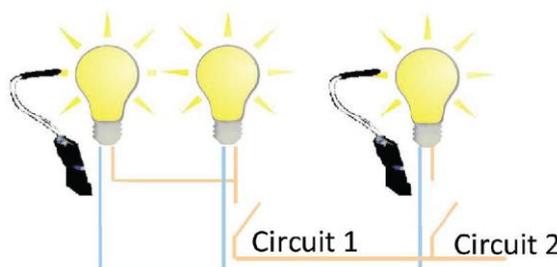
Caractéristiques

Type de capteur	Shunt
Précision	2%
Alimentation	Piles LR06
Fréquence d'acquisition	< 1seconde
Pas de temps de stockage	10 minute
Communication	Datalogger
Dimensions	120 x 65 x 40 cm

3.2.3 Lampemètre

Ce capteur permet de mesurer des durées d'éclairage sur les équipements d'éclairage terminaux. Il est équipé d'un senseur optique qui détecte les événements allumages/extinctions d'un foyer lumineux, ce qui permet un montage très rapide sans aucune intervention sur les circuits électriques.

Le logger mémorise les dates, heures, minutes et secondes des événements d'allumage et extinction.



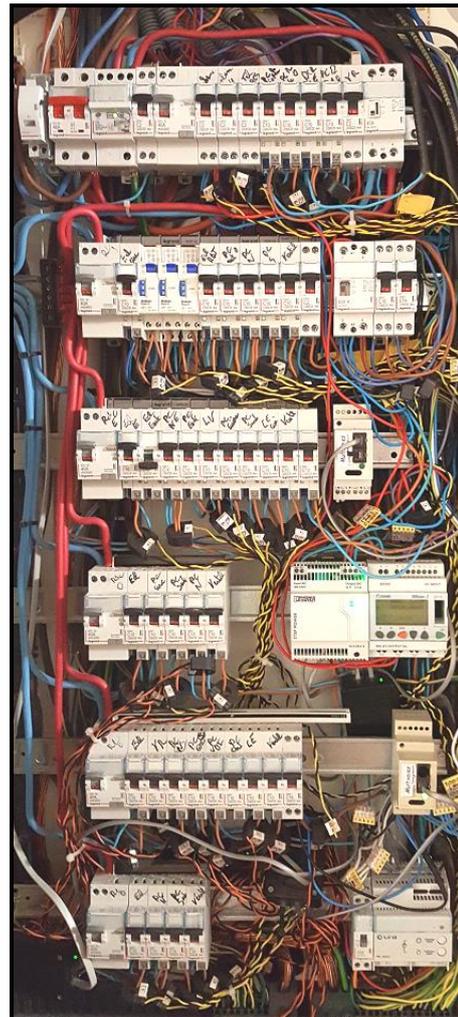
Caractéristiques

Type de capteur	Contact
Précision	1 seconde
Alimentation	Pile lithium CR2450
Fréquence d'acquisition	1 seconde
Pas de temps de stockage	De 1 s à 1 heure
Mémoire	> 1 an à 1 minute
Communication	Radio 802.15.4 2.4GHz 1mW
Dimensions	60 x 35 x 15 mm

3.3 Illustration détaillée de la pose

3.3.1 TGBT du bâtiment

Tous les départs monophasés du tableau électrique principal (TGBT en rez-de-jardin) ont été suivis avec le système Multivoies, pour un total de 40 départs monophasés (Figure 2).



Alarme intrusion
Alarme C4
Telecommande BAES
PC rouge Rdc Ouest
PC rouge R+1 Est
PC rouge R+1 Ouest
Ecl circulation
Ecl RdJ
PC ext_RdJ
PC Nord_RdJ
PC Sud_RdJ
Ventilation_RdJ
Sonnette
Ecl Rdc Est
Ecl extérieur
PC Nord_Rdc Est
PC extérieure
PC lave vaisselle
PC cuisine
PC Sud_Rdc Est
Chauffe eau cuisine
Ventilation_Rdc Est
PC radiateur
Ecl Rdc Ouest
Volet roulant Rdc
PC Sud_Rdc Ouest
PC Nord_Rdc Ouest
Ventilation_Rdc Ouest
Ecl R+1 Est
Volet roulant R+1
PC Nord R+1 Est
PC Sud R+1 Est
PC VDI
PC onduleur PV
Chauffe eau douche
Ventilation R+1 Est
Ecl R+1 Ouest
PC Nord R+1 Ouest
PC Sud R+1 Ouest
VentilationR+1 Ouest

TGBT instrumenté du LowCal avec et sans plastrons

Liste des départs suivis

Figure 2 : Instrumentation du TGBT.

3.3.2 Tableaux de dérivation (CTA)

Les consommations d'électricité de 15 caissons de ventilations décentralisés ont pu être individualisées à partir des tableaux de dérivation situés au RDC et au R+1 (Figure 3).

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

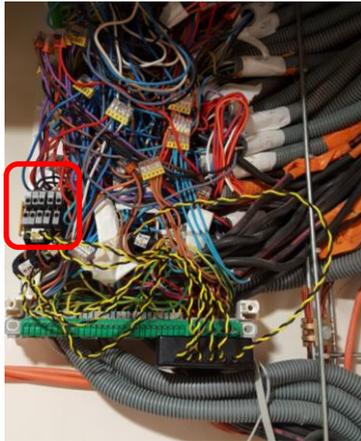


Tableau de dérivation RdC

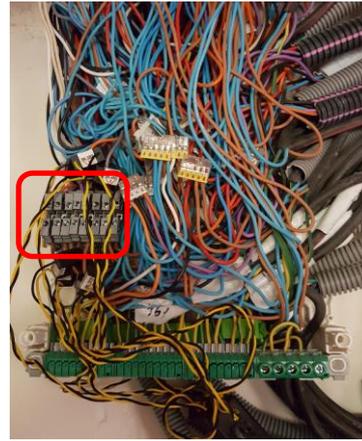


Tableau de dérivation R+1

Figure 3 : Suivi individualisé des CTA dans les tableaux de dérivation.

3.3.3 Eclairage

Les 7 départs spécifiques « Eclairage » sont suivis au TGBT par le système Multivoies :

- Circuit éclairage circulation
- Circuit éclairage extérieur
- Circuit éclairage RdJ
- Circuit éclairage RdC Est
- Circuit éclairage RdC Ouest
- Circuit éclairage R+1 Est
- Circuit éclairage R+1 Ouest

Des Lampemètres ont également été disposés sur 25 points lumineux afin de différencier les durées de fonctionnement pièce par pièce (Figure 4).

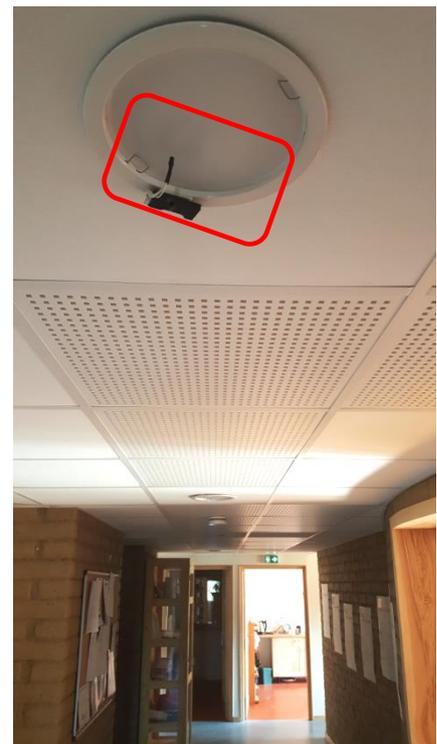


Figure 4 : Mesure des durées d'éclairage au lampemètre.

3.3.4 Equipements informatiques et autres appareils électriques

77 Wattmètres Série ont été déployés dans le bâtiment pour assurer le suivi individuel des appareils électriques sur prise. Le suivi a concerné :

- 25 ordinateurs portables

- 12 équipements « Serveur » (switch, livebox, serveur, autocom, routeur, onduleur, etc...)
- 10 écrans d'ordinateurs
- 3 lampes de bureaux
- 4 convecteurs électriques
- 4 équipements de reprographie (1 traceur et 3 imprimantes multifonctions)
- 4 équipements du réfectoire (2 fours micro-ondes, bouilloire, cafetière)

La Figure 5 illustre le suivi de quelques équipements.



Wattmètres Série sur la baie VDI



Wattmètres Série sur les équipements bureautiques

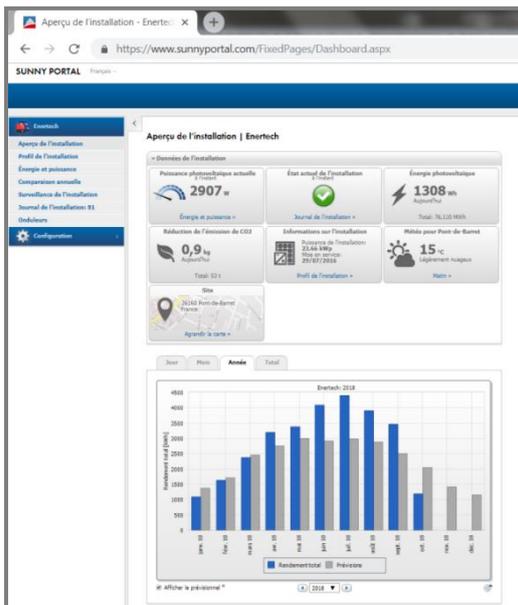


Wattmètres Série sur les équipements cuisine

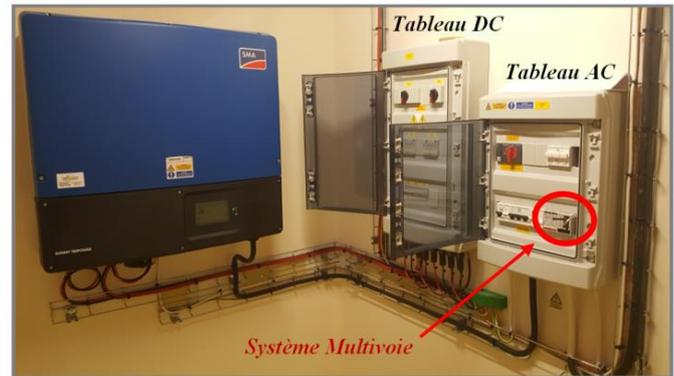
Figure 5 : Illustration du suivi de quelques appareils par wattmètres série.

3.3.5 Production solaire

Le suivi de la production solaire est assuré par le système Multivoies côté courant alternatif, mais aussi par le système SUNNY PORTAL de SMA (Figure 6).



Interface SUNNY PORTAL



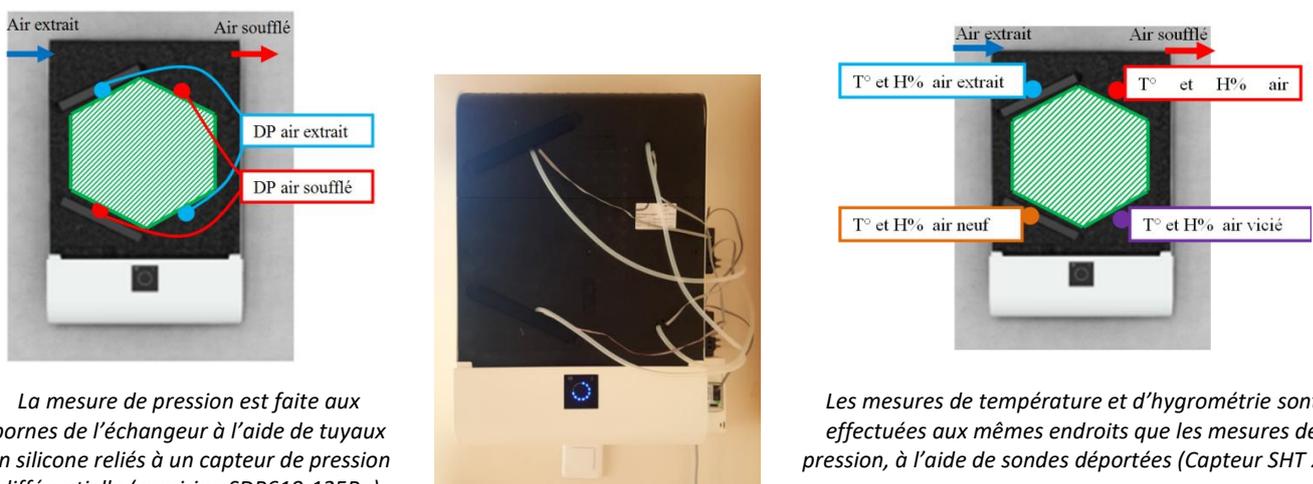
Local PV et système Multivoies

Figure 6 : Suivi de la production photovoltaïque.

3.3.6 Débits de ventilation

La mesure en continu des débits de soufflage et d'extraction a été effectuée sur 5 centrales de ventilation (Figure 7).

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.



La mesure de pression est faite aux bornes de l'échangeur à l'aide de tuyaux en silicone reliés à un capteur de pression différentielle (sensirion SDP610-125Pa)

Les mesures de température et d'hygrométrie sont effectuées aux mêmes endroits que les mesures de pression, à l'aide de sondes déportées (Capteur SHT 25)

Figure 7 : 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 Résultats de mesure

4.1 Consommation générale

4.1.1 Répartition des consommations par usage

La consommation d'électricité du bâtiment mesurée par le système multivoie est de **4814 kWh_{él}** entre mars 2017 et mars 2018 et de **5637 kWh_{él}** entre mars 2018 et mars 2019 (avec un mois en commun sur ces deux plages temporelles). Ces consommations mesurées sont parfaitement cohérentes avec les différences d'index relevées au compteur EDF.

La consommation moyenne résultante sur deux ans représente **7,0 kWh_{él}/m²_{shon}/an tous usages confondus**, et **3,8 kWh_{él}/m²_{shon}/an hors chauffage et ECS**.

La répartition des consommations par usage est présentée en Figure 8. Ce graphique regroupe l'ensemble des départs électriques suivis durant deux ans par grand type d'usage (chauffage, bureautique, éclairage, etc.).

NB : l'évolution annuelle et mensuelle par usage est abordée plus loin dans le §4.1.2.

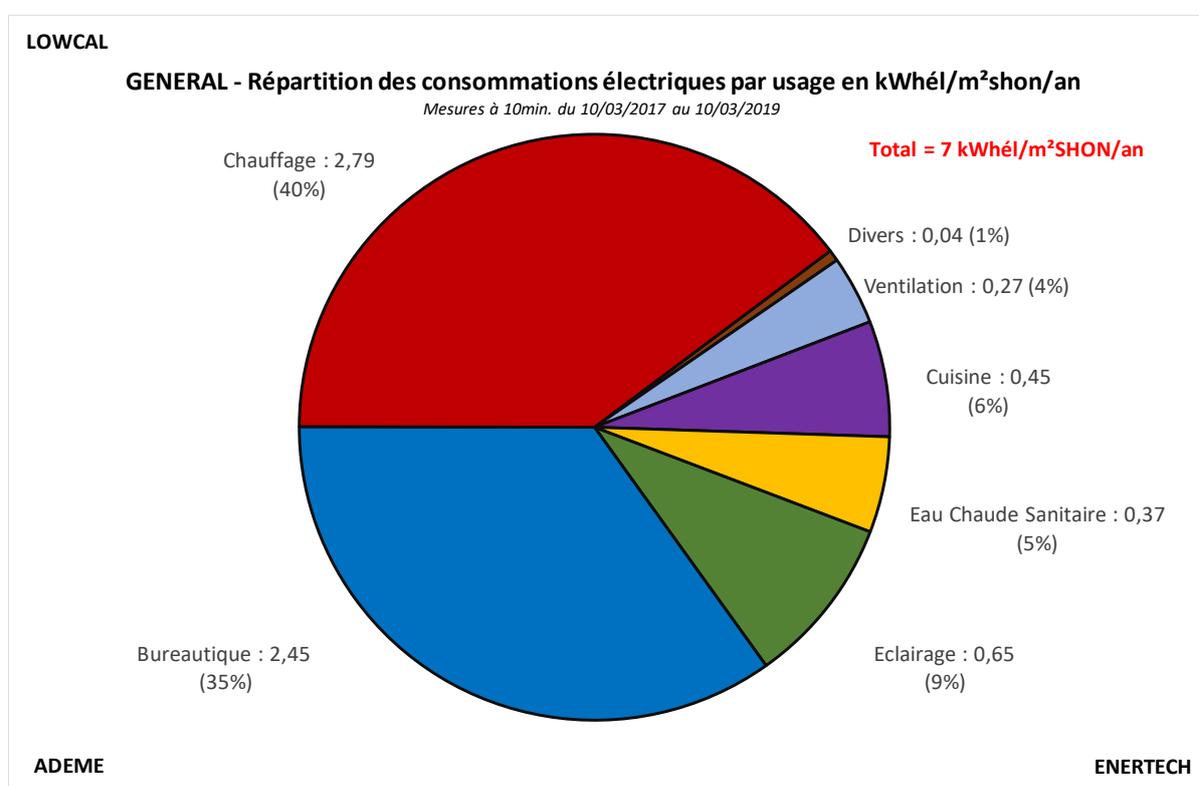


Figure 8 : Répartition des consommations électriques par usage (LowCal, mars 2017 – mars 2019).

Le chauffage correspond au fonctionnement de 4 convecteurs électriques d'appoint, de 1000 W chacun, disposés dans le couloir du RDC et asservis en « tout ou rien » à la température de la masse du bâtiment⁴ (consigne 20°C ; hystérésis 0,2K) ainsi qu'à une programmation horaire diurne, permettant de maximiser l'autoproduction photovoltaïque. Un interrupteur situé au RDC permet de déroger à cette programmation en effectuant un arrêt forcé du chauffage.

⁴ La température de masse est mesurée par une sonde insérée au centre d'une brique de terre crue du refend nord du R+1 du bâtiment.

Le chauffage est le premier poste de consommation du bâtiment avec 40 % de la consommation totale. **Ce poste demeure toutefois exceptionnellement faible avec un ratio de consommation moyen de 2,8 kWh_{él}/m²_{shon}/an** ce qui représente en moyenne 2034 kWh_{él}/an sur les deux années de suivi. **Le bâtiment est donc majoritairement chauffé par le soleil** comme le prévoyait la simulation⁵. L'appoint de chauffage par effet joule est marginal.

La consommation de chauffage est stable de l'année 1 à l'année 2. Cependant la part relative de cet usage sur la consommation totale du bâtiment diminue de 10 % en année 2 en passant de 45 % à 36 % (2198 kWh_{él}/an en année 1 à 2024 kWh_{él}/an en année 2) du fait de l'augmentation des autres usages.

La bureautique, deuxième poste de consommation, représente 35 % de la consommation totale soit **2,5 kWh_{él}/m²_{shon}/an** ou encore 1788 kWh_{él}/an en moyenne sur les deux années suivies. En année 2, la consommation de la bureautique a égalé celle du chauffage avec 36 % de la consommation totale du bâtiment.

Une augmentation de 32 % de la consommation de cet usage a été observée entre l'année 1 et l'année 2 (1565,5 kWh_{él}/an en année 1 à 2051,5 kWh_{él}/an en année 2). Elle s'explique principalement par l'augmentation du nombre d'ETP (« équivalent temps plein ») de l'entreprise qui est passé de 10,6 ETP/jour ouvré à 12,4 ETP/jour ouvré.

Il faut souligner, là encore, le ratio de consommation exceptionnellement faible de cet usage au regard des ratios habituellement rencontrés dans d'autres bâtiments (jusqu'à 10 fois plus importants, Cf. §4.1.5). Ce résultat reflète l'expérience d'ENERTECH en matière de maîtrise de la demande d'électricité ainsi que la sobriété des collaborateurs de l'entreprise en matière de gestion des équipements (extinction quotidienne des serveurs, de l'ensemble des périphériques, des ordinateurs, etc.).

L'éclairage, troisième poste de consommation, représente 9 % de la consommation totale avec un ratio moyen de **0,65 kWh_{él}/m²_{shon}/an** sur les deux années suivies. La performance de ce poste est spectaculaire : à titre d'exemple, un bâtiment de bureaux récemment mesuré à Créteil présentait un ratio de consommation d'éclairage par unité de surface 25 fois supérieur. Le résultat très performant de LowCal en matière d'éclairage repose sur une optimisation de l'ensemble des paramètres d'influence : maximisation de l'éclairage naturel, optimisation des niveaux d'éclairement, performance des luminaires et minimisation des durées d'éclairement par sobriété comportementale des usagers.

Les usages **Cuisine, Eau Chaude Sanitaire et Ventilation** représentent, à peu près, à parts égales, les 16 % de consommation restants. On peut noter que **la ventilation avec une consommation de 0,3 kWh_{él}/m²_{shon}/an est un poste particulièrement faible au regard des consommations habituellement rencontrées** (par exemple 20 fois inférieur au bâtiment cité précédemment) ce qui traduit l'efficacité du choix décentralisé (absence de réseaux, moins de pertes de charge) et la sobriété d'utilisation (l'interrupteur manuel permettant de ne ventiler que dans les bureaux occupés et lorsque les usagers sont présents).

⁵ Sur la période de chauffage (la plus critique) les apports solaires sont estimés en STD à 5,8 kWh/m² soit 50 % du besoin de chaleur. Sur la période hivernale entière, les chiffres s'élèvent à 11,9 kWh/m² et 61 % du besoin de chaleur (cf. §2.2.2 rendu 1.3).

4.1.2 Evolutions annuelles et mensuelles des consommations.

Evolutions annuelles

Les premières mesures du LowCal ont débuté peu après la mise en service des locaux en août 2016 et ont fait l'objet, une année plus tard, d'un « 1^{er} bilan ».

Les données de ce « 1^{er} bilan ». (sept. 2016 – août 2017) sont notamment exposées dans la plaquette de présentation du bâtiment, qui est remise à jour annuellement à l'occasion du nouveau bilan : <http://leblog.enertech.fr/articles-techniques/item/65-plaquette-de-presentation-du-lowcal>.

En comparant ce « 1^{er} bilan » à la présente campagne de mesure (mars 2017 à mars 2019), nous observons que la consommation du bâtiment a connu une forte augmentation entre la 1^{ère} année et les années suivantes (Figure 9). Cette évolution d'environ + 60% s'explique par l'augmentation du nombre d'occupants mais aussi par une mise en route trop tardive de l'appoint de chauffage lors de la première saison de chauffe, le bâtiment ayant évolué durant le mois de décembre 2016 vers des températures trop froides qui n'ont pas été reproduites les années suivantes.

L'augmentation de la consommation entre les années 1 et 2 peut être partiellement attribuée à l'augmentation de l'effectif (15,4 ETP à 17,3 ETP soit + 12 %).

Le Tableau 2 montre par ailleurs que les parts relatives de consommation des différents usages sont globalement conservées d'une année sur l'autre. L'ECS et la bureautique ont toutefois augmenté au détriment du chauffage qui constitue une consommation à peu près constante. La consommation de la bureautique a ainsi égalé celle du chauffage en année 2.

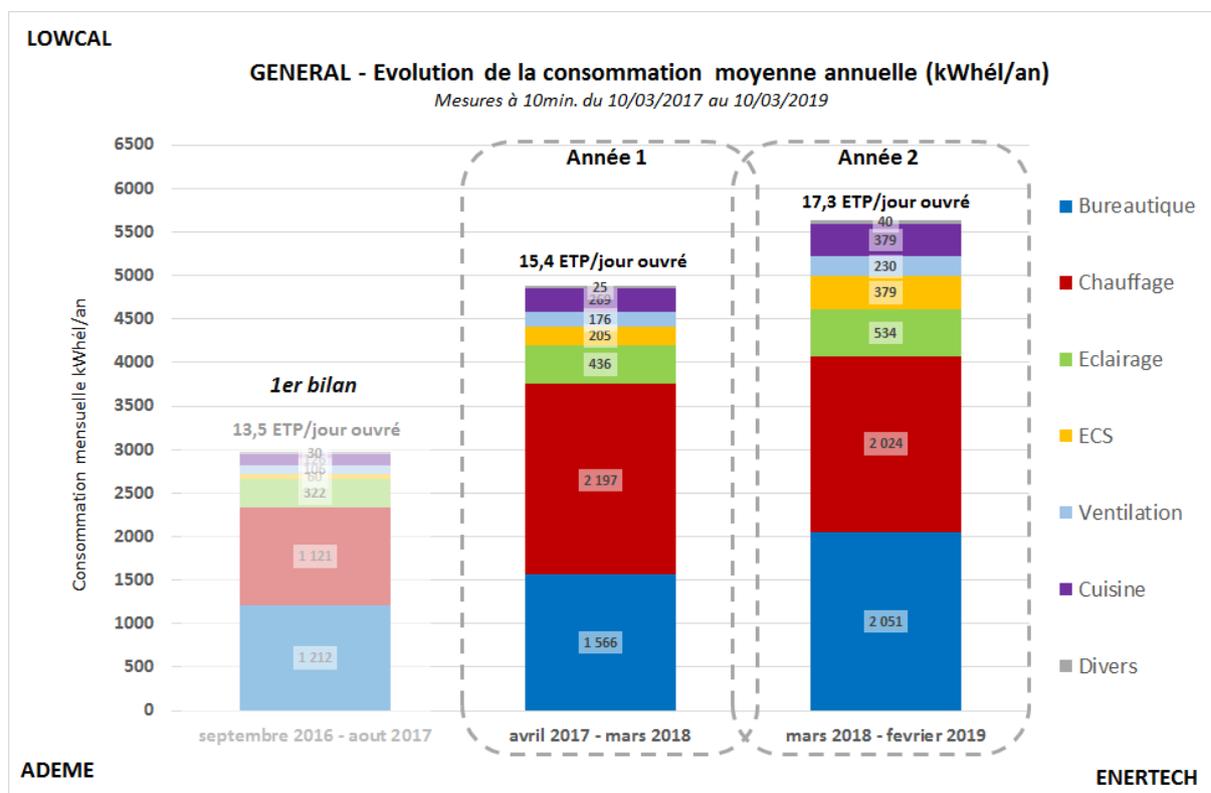


Figure 9 : Evolution de la consommation annuelle de LowCal par usage.

	Evolution		kWhél/an		Répartition (%)	
			ANNEE 1 avril 2017 mars 2018	ANNEE 2 mars 2018 février 2019	ANNEE 1 avril 2017 mars 2018	ANNEE 2 mars 2018 février 2019
Divers	↗	61%	24,6	39,7	1%	1%
Ventilation	↗	31%	175,9	229,8	4%	4%
Cuisine	↗	41%	268,7	379,3	6%	7%
Eau Chaude Sanitaire	↗	85%	204,7	379,3	4%	7%
Eclairage	↗	22%	436,3	533,6	9%	9%
Bureautique	↗	31%	1565,6	2051,4	32%	36%
Chauffage	↘	-8%	2197,4	2023,8	45%	36%
TOTAL	↗	16%	4873	5637		
<i>Equivalent Temps Plein</i>	↗	<i>12%</i>	<i>15,4</i>	<i>17,3</i>		

Tableau 2 : Evolution des consommations par usage entre l'année 1 et l'année 2 ⁽⁶⁾.

On peut toutefois noter que l'augmentation des consommations d'électricité hors chauffage entre l'année 1 et l'année 2 est significativement supérieure (+ 35 %) à l'augmentation de l'occupation (+ 12 %). Tous les usages (hors chauffage) ont augmenté plus rapidement que la fréquentation, avec une importance sensible sur la consommation totale de la bureautique et de l'ECS. Pour la consommation d'ECS, cela s'explique par l'arrivée de collaborateurs effectuant le trajet domicile>Local en vélo avec un besoin de se doucher à l'arrivée.

Quant à elle, l'augmentation sensible de la bureautique n'est pas totalement expliquée. Elle peut être liée à l'utilisation d'un écran d'appoint par davantage de collaborateurs ainsi qu'au serveur de calcul qui a été mis en place en janvier 2019.

Evolutions mensuelles

Les consommations mensuelles par usage sont présentées sur le graphique de la Figure 10. On observe :

- Que la saison de chauffe s'étend sur environ 4 mois (décembre à mars) avec une prédominance marquée des mois de décembre et janvier, surtout en année 1 ;
- Que les usages ECS et éclairage ont une saisonnalité marquée avec une augmentation significative en hiver ;
- Que les usages de bureautique et de cuisine fluctuent de manière indépendante des saisons, puisqu'ils sont plus directement liés au nombre de jours travaillés, donc au nombre de jours ouverts par mois et aux périodes de congés ;
- Que l'usage ventilation est globalement stable.

⁶ Nota : les périodes Année 1 et Année 2 ont en commun le mois de mars 2018. Cela permet d'avoir 12 mois complets et 4 mois de chauffe complets sur chacune des 2 années, ce qui n'aurait pas pu être le cas en partant du 10 mars 2017 pour l'année 1 et en finissant le 10 mars 2019 pour l'année 2.

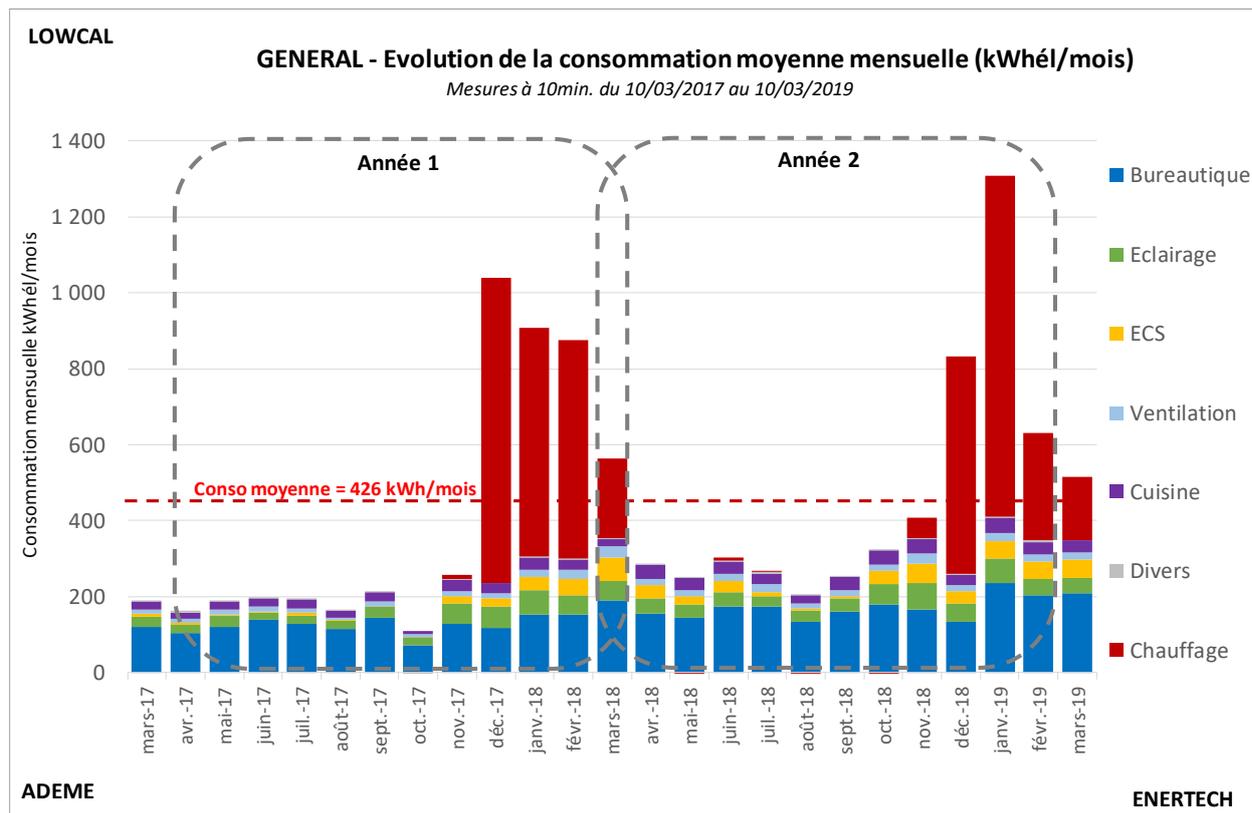


Figure 10 : Evolution de la consommation électrique mensuelle de LowCal par usage.

4.1.3 Puissances appelées – fréquences cumulées et courbes de charge

La puissance souscrite, de l'installation électrique de LowCal, est de 9 kVA.

La Figure 11 montre que, durant 85 % du temps lors des deux années de mesures, la puissance appelée par le bâtiment a été inférieure à 2000 W. **Plus de la moitié du temps, la puissance appelée est quasiment nulle du fait de l'utilisation d'un interrupteur de coupure générale visant à supprimer toute consommation de veille, hors occupation.**

Quelques pics dépassant 8 kW ont été mesurés. Parmi ces pics, les 10 plus importants ont été observés :

- le 01/02/2019 en début d'après-midi, lorsque le chauffage et l'ECS fonctionnaient, mais également lorsqu'un véhicule électrique était en charge sur l'une des prises extérieures du bâtiment (voir colonne « Divers » en Figure 11). La charge de ce véhicule était un événement ponctuel ;
- le 08/01/2019 à la pause déjeuner, lorsque le chauffage et l'ECS fonctionnaient mais également lorsque 2 appareils à raclette fonctionnaient (voir colonne « PC » en Figure 11) à l'occasion d'un repas d'entreprise.

NB pour la suite : En semaine, les heures d'ouverture du bâtiment peuvent être considérées de 7h à 20h ce qui représente 65 heures d'occupation dans une semaine classique (soit 39 % du temps au cours d'une semaine travaillée).

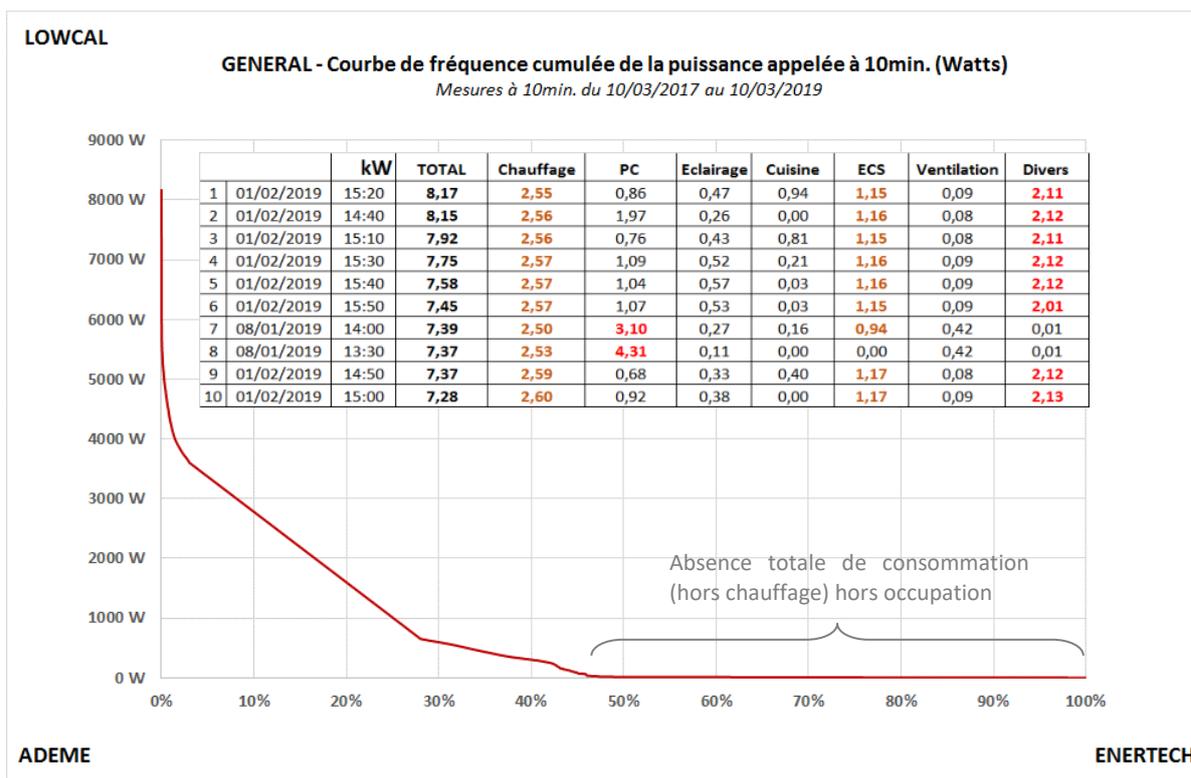


Figure 11 : Courbe de fréquence cumulée de la puissance électrique appelée à 10min par le bâtiment.

Nous constatons sur le graphique de la Figure 12 que les forts appels de puissance du bâtiment sont à associer au fonctionnement du chauffage.

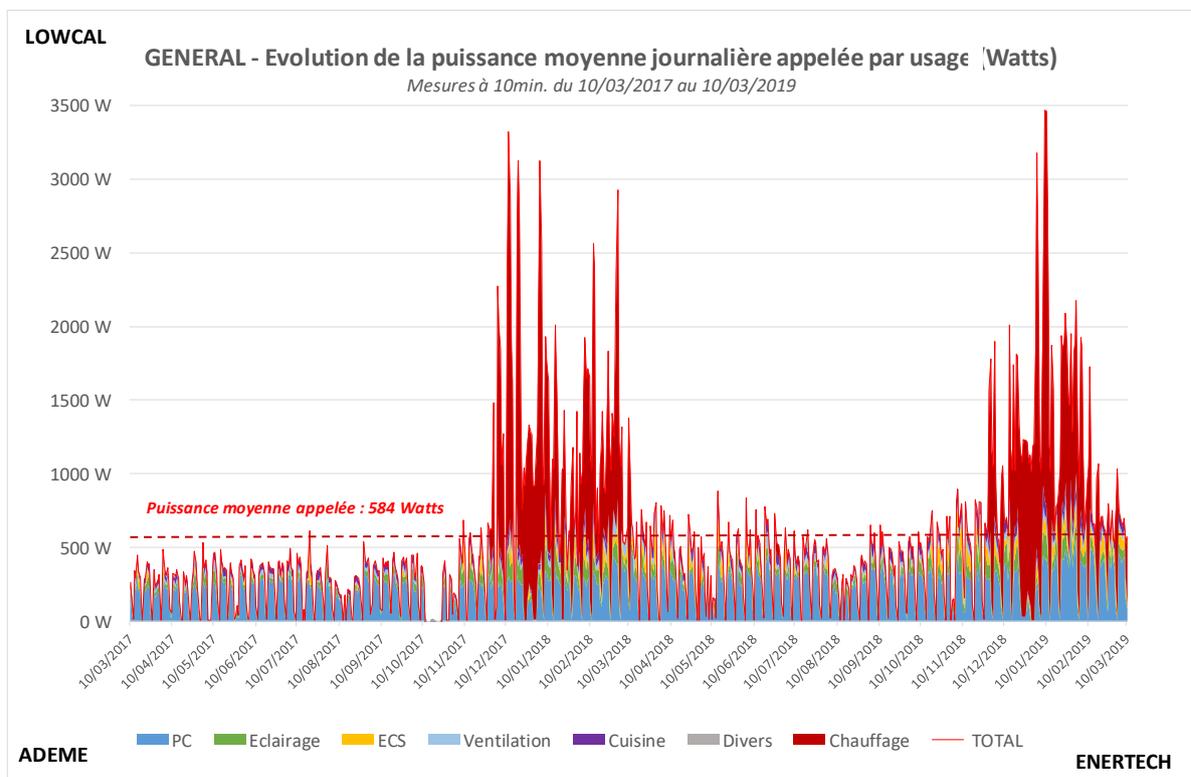


Figure 12 : Evolution des puissances moyennes journalières appelées par le bâtiment.

Courbes de charges

Les courbes de charge moyennes d'appel de puissance sont présentées en Figure 13 et Figure 14. Elles permettent d'observer :

- La quasi-absence de talon de consommation les soirs et week-ends, liée à une bonne utilisation de l'interrupteur de coupure général du bâtiment. Les appels de puissance, observés le samedi, correspondent au travail des agents de surface ainsi qu'à quelques heures supplémentaires effectuées par des collaborateurs de l'entreprise.
- Quelques cas de fonctionnement du chauffage la nuit (Figure 14). Il est en effet possible d'activer la dérogation de la programmation horaire sur ce « circuit PC rouge » indépendant de l'interrupteur de coupure général du bâtiment (Cf. §4.2.1). L'absence de talon de consommation « chauffage » le week-end montre que la programmation horaire a été systématiquement réenclenchée le vendredi soir.

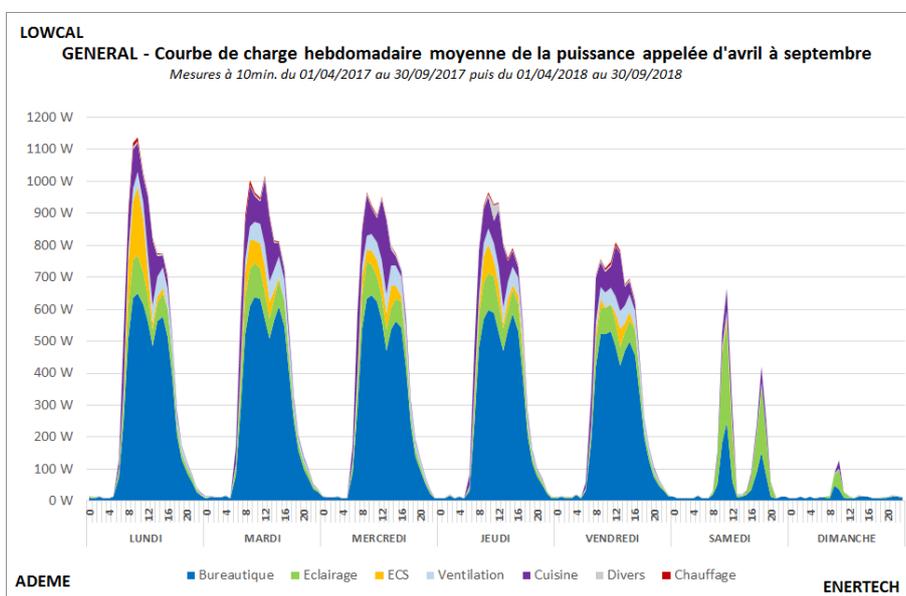


Figure 13 : Courbe de charge hebdomadaire des puissances appelées d'avril à septembre (moyenne 2017-2018)

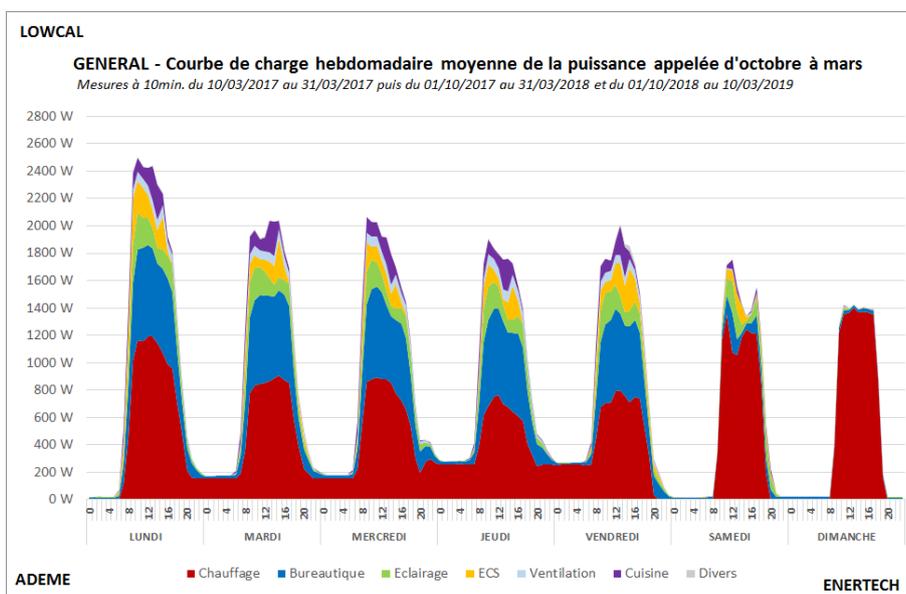


Figure 14 : Courbe de charge hebdomadaire des puissances appelées de septembre à avril (moyenne 2017-2018)

4.1.4 Comparaison de la mesure avec les calculs faits en conception

Le graphique suivant reprend les résultats de mesure (convertis en énergie primaire⁷) et les compare à deux calculs réalisés en conception :

- Au calcul physique (prévisionnel) reposant sur une STD pour le chauffage et sur des ratios de consommation réalistes, extraits de campagnes de mesures.
- Au calcul réglementaire RT2012 (conventionnel) duquel est par ailleurs extrait un bilan BEPOS.

On note l'écart particulièrement sensible des « autres usages » du calcul réglementaire avec la réalité, ainsi que la sous-estimation de la consommation de chauffage par ce dernier.

Les consommations d'éclairage ont été surestimées par les deux calculs, ainsi que la consommation d'ECS.

On note enfin que le calcul réglementaire a surestimé la consommation d'électricité de la ventilation.

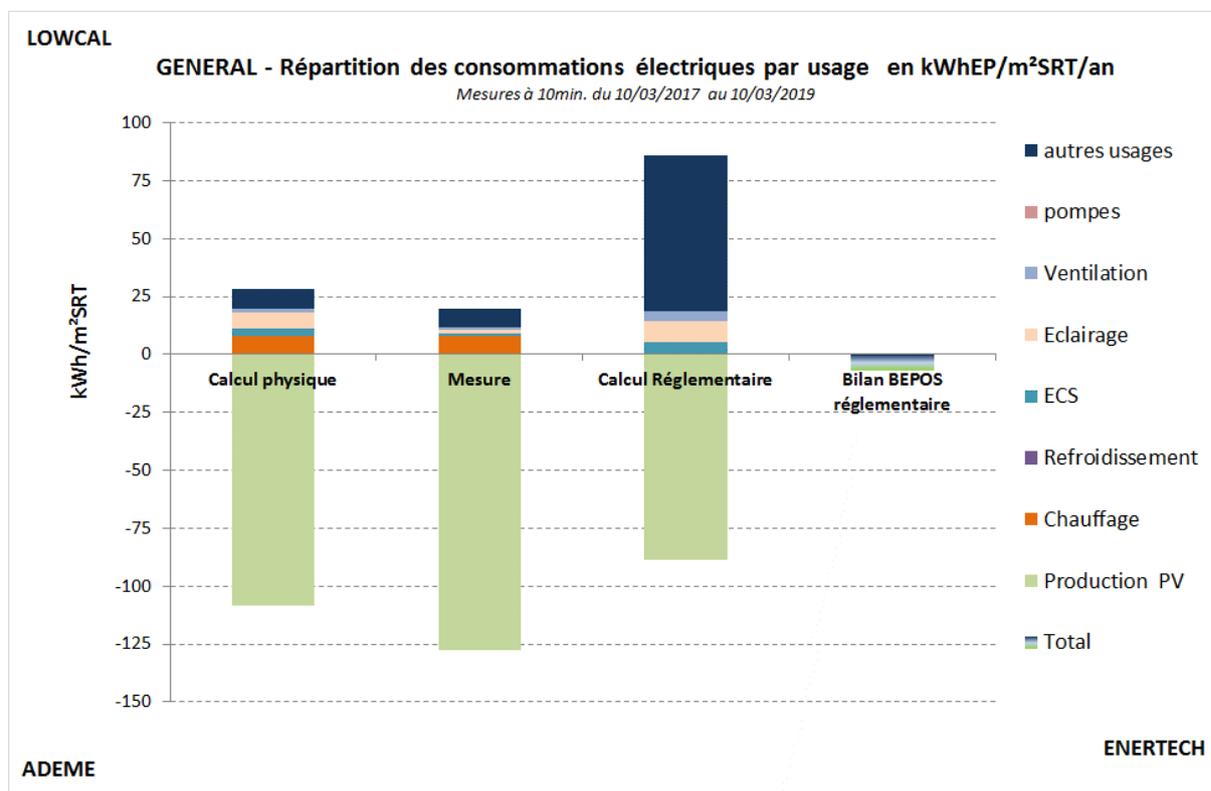


Figure 15 : Comparaison des consommations mesurées et calculées en conception.

Ainsi, alors même que le bilan BEPOS réglementaire est à peine favorable, **le bilan mesuré montre que le bâtiment produit plus de 6 fois plus d'énergie qu'il n'en consomme tous usages confondus (chauffage compris).**

⁷ Coefficient de transformation de l'électricité en énergie primaire : 2,58.

4.1.5 Comparaison des consommations de LowCal avec d'autres bâtiments

La Figure 16 compare les consommations d'électricité spécifique de LowCal avec quelques bâtiments de bureaux qui ont fait l'objet d'une campagne de mesure au cours des 10 dernières années (le plus récent étant le bâtiment de Créteil, la campagne ayant été réalisée en 2018/2019).

Même si la comparaison entre deux bâtiments, usage par usage, est toujours délicate, on ne peut que constater **la sobriété spectaculaire des consommations d'électricité spécifique du bâtiment LowCal par rapport aux bâtiments du même type.**

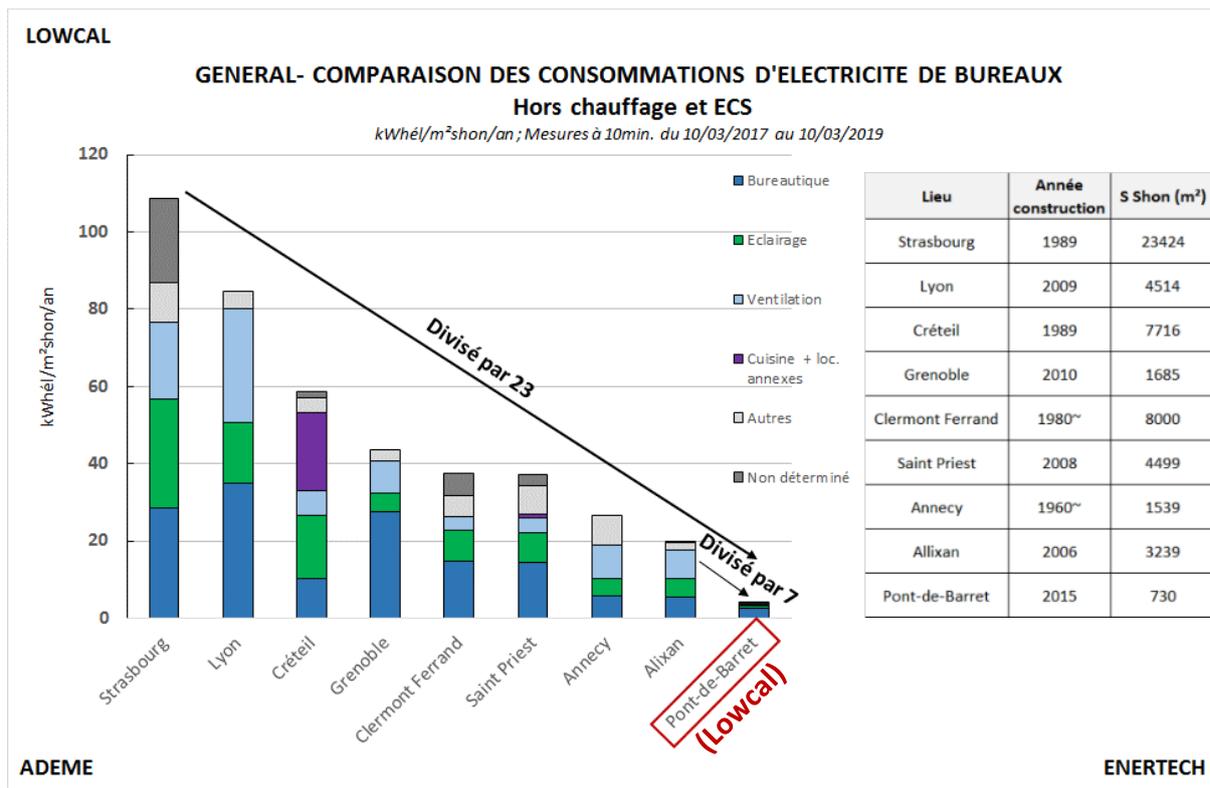


Figure 16 : Comparaison des consommations d'électricité spécifique mesurées dans quelques bâtiments de bureaux.

4.2 Chauffage

4.2.1 Description de l'installation

L'émission de chauffage des 620 m² de surface utile est assurée par 4 convecteurs électriques mobiles de puissance unitaire 1000 W tous situés dans le couloir du RDC.

L'alimentation de ces convecteurs est assurée par un circuit « prise rouge » indépendant de l'interrupteur de coupure général du bâtiment.



4 convecteurs électriques de 1000W chacun

Les convecteurs sont asservis, via un automate, à la **température de la masse du bâtiment**⁸ (consigne 20°C ; hystérésis 0,2K). Ce même automate assure une **programmation horaire** (fonctionnement 8h-19h) qui permet de maximiser l'autoconsommation photovoltaïque.

Deux interrupteurs, à commande manuelle, permettent également :

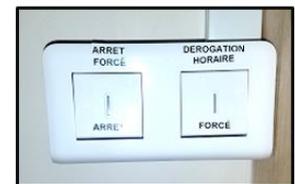
- De déroger à la **programmation horaire** en activant une marche forcée,
- De déclencher un **arrêt forcé**, notamment lorsque la masse est inférieure à 20°C mais que l'ensoleillement est fort.



Sondes de température « Masse »



Automate



Arrêt forcé et dérogation horaire

4.2.2 Consommation mesurée

Le chauffage est le premier poste de consommation d'électricité du bâtiment avec **40 % de la consommation totale (2034 kWh_{él}/an soit 2,8 kWh_{él}/m²_{shon}/an)**. Ce ratio de consommation exceptionnellement faible confirme les résultats vus en simulation thermique dynamique, selon lesquels le bâtiment est essentiellement chauffé par le soleil (61 % des apports de chaleur en hiver selon la STD, Cf. rendu 1.3 §2.2.2). Les déperditions extrêmement faibles de l'enveloppe permettent par ailleurs de restreindre l'émission de chauffage à quelques convecteurs d'appoint rassemblés dans le couloir du rez-de-chaussée.

4.2.3 Profil de fonctionnement

La Figure 17 illustre les profils de fonctionnements des convecteurs électriques. On peut constater la durée très courte de la saison de chauffe (les convecteurs n'ont pas fonctionné du 11/03/2018 au 29/11/2018) ainsi que le caractère très occasionnel de l'utilisation de la dérogation au programme horaire.

⁸ La température de masse est mesurée grâce à une sonde placée au centre d'une brique de terre crue du refend nord au R+1 du bâtiment.

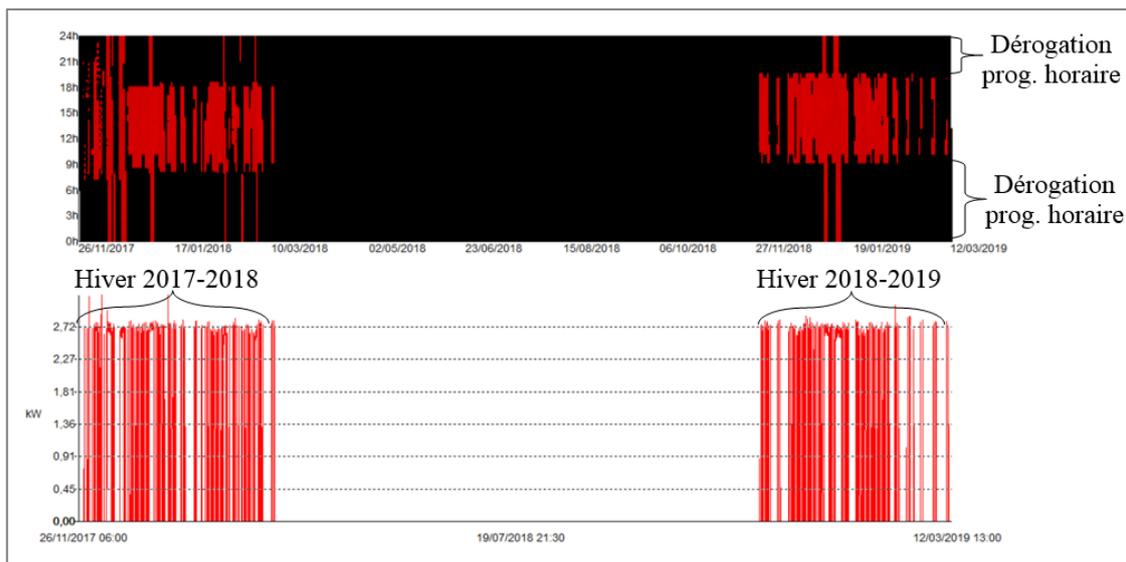


Figure 17 : Diagramme d'intermittence (en haut) et profil temporel (en bas) d'appel de puissance des convecteurs électriques de novembre 2017 à mars 2019.

La Figure 18 illustre le fonctionnement des convecteurs électriques en fonction de la température de la masse durant 3 semaines types de l'hiver 2017-2018 (22/01/2018-13/02/2018).

- Lors de la **phase 1** on constate que les apports solaires, les apports internes et l'appoint occasionnel de chauffage permettent à la masse de se maintenir en température. On observe sur cette phase 1 le bon fonctionnement de la régulation, avec l'évolution de la puissance appelée des convecteurs en fonction de la température de la masse (allumage sur programmation horaire ; coupure sur sonde de température) ;
- Lors de la **phase 2**, on constate une chute progressive de la température de la masse du bâtiment malgré un fonctionnement des convecteurs sur l'intégralité de leur plage de programmation horaire. Lors de cette semaine froide et peu ensoleillée les plages horaires ne sont pas suffisantes pour que l'appoint électrique permette le maintien en température ;
- Lors de la **phase 3**, constatant la chute progressive de la température de la masse, la semaine précédente, la dérogation à la programmation horaire est enclenchée ce qui permet au bâtiment de remonter en température. Cette utilisation de la dérogation est également observable sur la Figure 17 (première des trois dérogations entre le 17/01 et le 10/03/2018).

NB : La droite en pointillés rouges représente la température de consigne programmée.

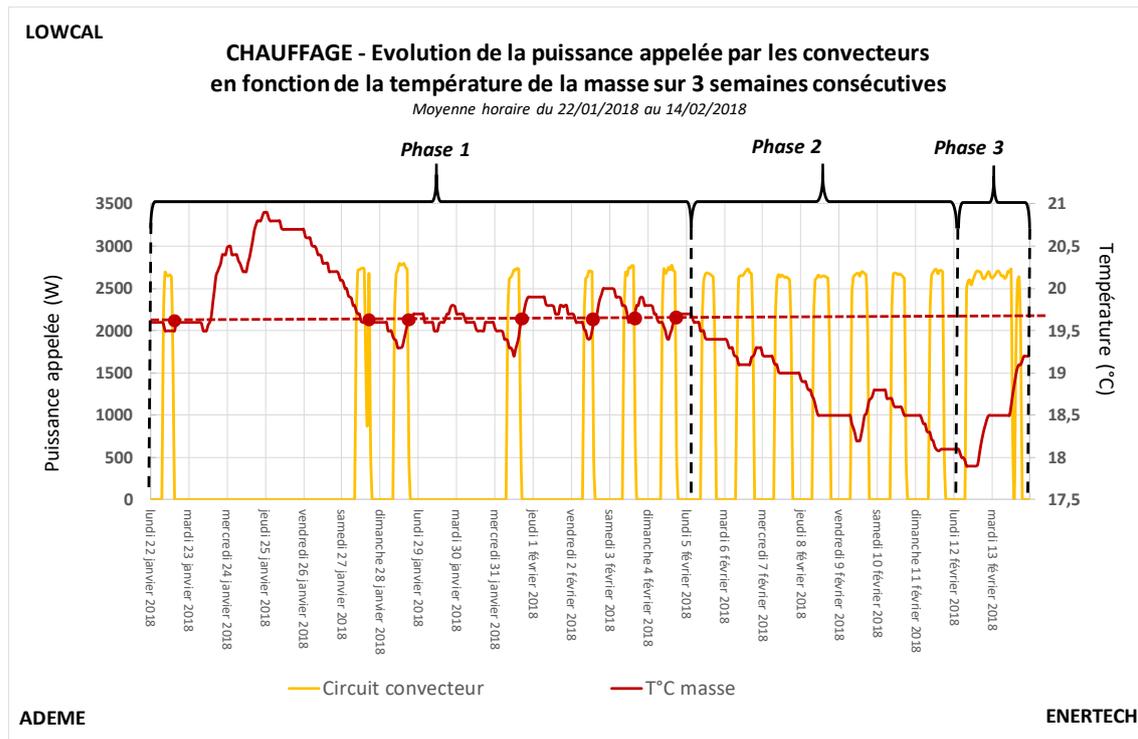


Figure 18 : Illustration de l’asservissement des convecteurs à la température de la masse.

La Figure 19 présente les courbes de charge moyenne de l’appel de chauffage et de la température de masse du bâtiment. Ce graphe montre que les dérogations à la programmation horaire n’ont eu lieu qu’en semaine, expliquant en partie la consommation de « relance » visible le lundi et suivie d’une diminution au fil de la semaine. Les appels de puissance importants le week-end peuvent s’expliquer par l’absence d’apports internes, l’absence de chauffe la nuit et la réduction des apports solaires (fermeture de certains BSO et volets pour assurer l’anti intrusion).

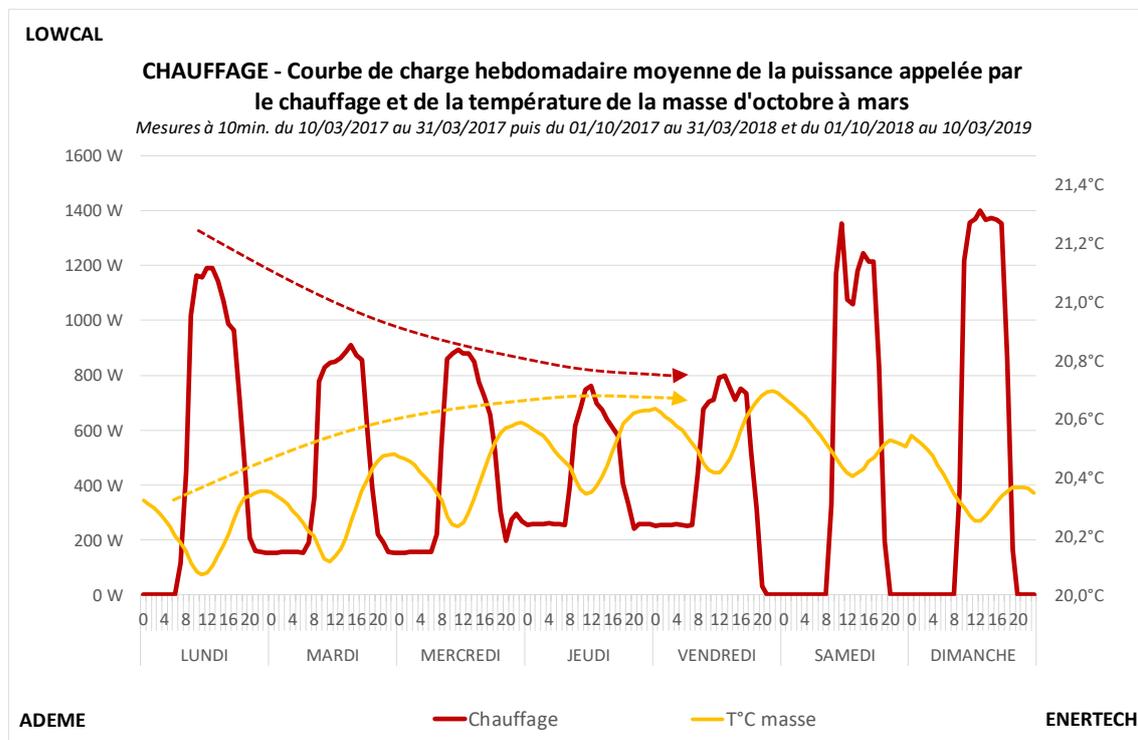


Figure 19 : Courbes de charge moyenne hebdomadaire de la puissance appelée par le chauffage et de la température de masse du bâtiment (mars 2017 – mars 2019).

Soulignons pour conclure que l'appoint de chauffage n'est présent à LowCal que du fait de la très grande maîtrise des apports internes électriques. Avec des apports « plus classiques » tels que mesurés dans d'autres bâtiments de bureaux (même performants) il y aurait au minimum 20 kWh_{él}/m²/an d'apports électriques supplémentaires soit 6 kWh_{él}/m² en période de chauffe ce qui supprimerait purement et simplement le besoin de chauffage résiduel de 2,8 kWh_{él}/m²/an.

4.3 Bureautique

4.3.1 Description de l'installation

Le suivi des consommations électriques totales de bureautique a été réalisé par le système Multivoie sur les 14 départs électriques dédiés au TGBT (Tableau 3).

PC Sud_Rdj	PC Sud_Rdc Ouest	PC Nord R+1 Est	PC VDI
PC Nord_Rdj	PC Nord_Rdc Ouest	PC Sud R+1 Est	PC rouge Rdc Ouest
	PC Nord_Rdc Est	PC Nord R+1 Ouest	PC rouge R+1 Est
	PC Sud_Rdc Est	PC Sud R+1 Ouest	PC rouge R+1 Ouest

Tableau 3 : départs du TGBT dédiés à la bureautique.

Par ailleurs, 45 wattmètres série ont été disposés à la prise de branchement de chacun des équipements pour permettre une discrimination plus fine des usages. La liste détaillée des équipements du bâtiment est présentée dans le Tableau 4.

Baie VDI	Postes de travail
1 alimentation sans interruption (onduleur) 1 autocom (PABX) alimentant 30 téléphones numériques 2 box ADSL 1 routeur 3 switches (1 switch 24 ports + 2 switches 8 ports) 3 serveurs (« fichier » DS01, « mails » et « calcul »)	24 PC portables 10 écrans externes 23 ou 24 pouces 1 portable et une unité centrale dans l'atelier
Matériel de visioconférence	Matériel d'impression
1 écran LED 40 pouces 1 tour caméra + micro + haut-parleur 1 pieuvre téléphonique	1 imprimante scanner multifonctions A4 (jet d'encre) 1 imprimante scanner multifonctions A3 (jet d'encre) 1 imprimante A3 (jet d'encre) 1 traceur

Tableau 4 : Liste des équipements de bureautique du bâtiment

4.3.2 Consommation mesurée

La bureautique est le deuxième poste de consommation après le chauffage avec 35 % de la consommation et une moyenne sur deux années de 1788 kWh_{él}/an soit 2,45 kWh_{él}/m²_{shon}/an ou encore 110 kWh_{él}/an/ETP.

La Figure 20 permet de comparer ce résultat aux consommations d'électricité de bureautique de quelques bâtiments qui ont fait l'objet d'une campagne de mesure au cours des 10 dernières années (le plus récent étant le bâtiment de Créteil, la campagne ayant été réalisée en 2018/2019). Le ratio de consommation de bureautique de LowCal est spectaculairement faible malgré l'occupation totale du bâtiment. Les quelques éléments suivants permettent d'expliquer ce résultat : utilisation d'ordinateurs portables, peu de postes avec écran d'appoint, serveurs et baie VDI éteints en inoccupation, extinction complète des veilles en inoccupation grâce à l'interrupteur général.

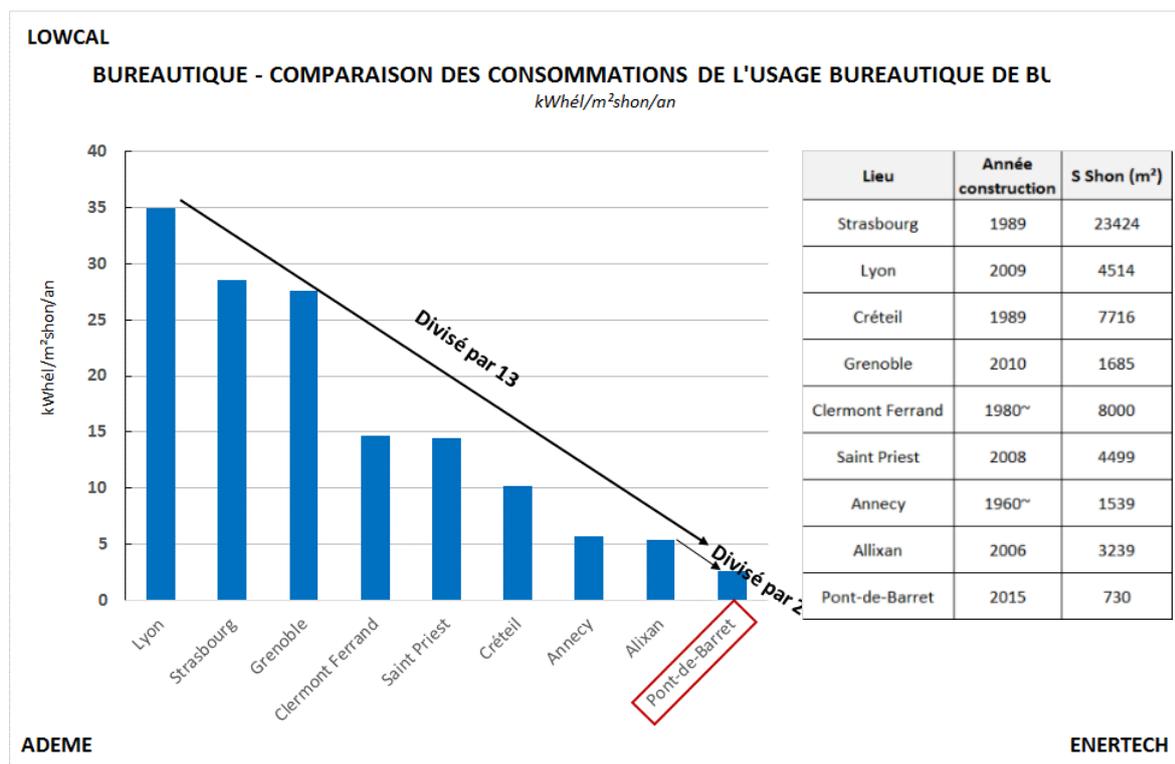


Figure 20 : Comparaison des consommations de bureautique mesurées dans plusieurs bâtiments de bureaux.

La Figure 21 montre que la consommation électrique de l’usage bureautique à LowCal est composée, pour les deux tiers, des postes de travail des usagers ; le dernier tiers étant imputable à la VDI.

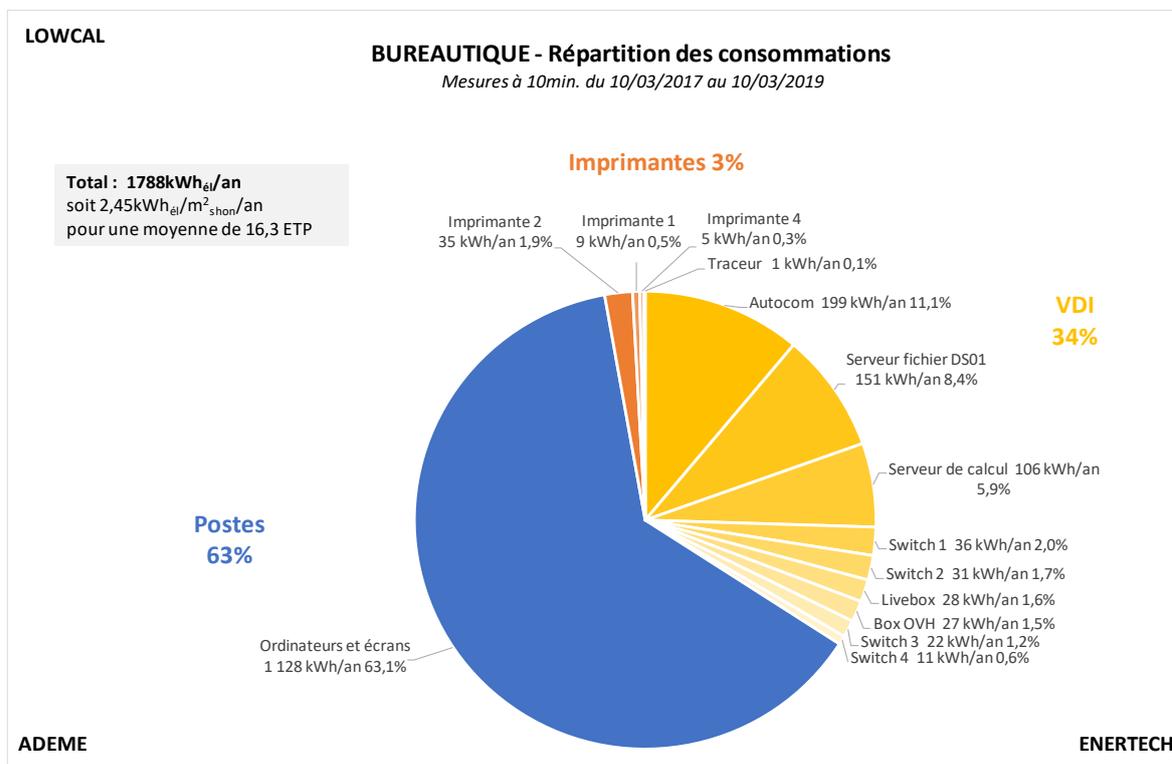


Figure 21 : Répartition des consommations de bureautique dans le bâtiment LowCal.

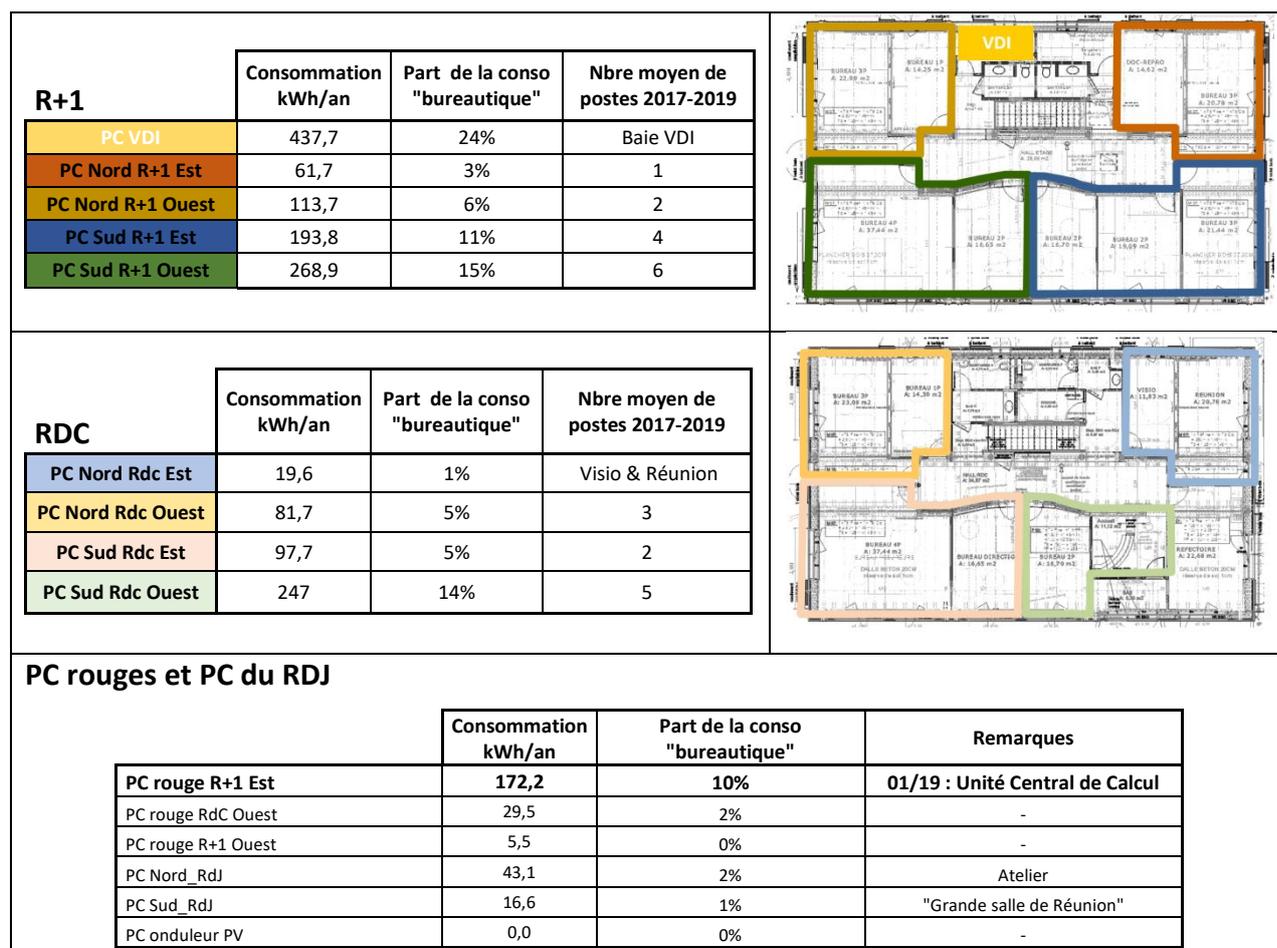


Figure 22 : Consommation mesurée sur les différents départements PC au TGBT du bâtiment.

4.3.3 Répartition des consommations par équipement

La Figure 23 présente les consommations annualisées mesurées par équipement à l'aide des Wattmètres Série. Les équipements concernés n'ont pas tous été suivis sur la période complète de la campagne (mars 2017-mars 2019), du fait des arrivées/départs de collaborateurs et des modifications des espaces de travail.

Les consommations moyennes observées sont de 40,2 kWh_{el}/an par poste de travail avec 16,5 kWh_{el}/an pour les écrans et 33,5 kWh/an pour les ordinateurs portables.

Un **serveur de calcul** a été mis en place courant janvier 2019, soit 2 mois avant la fin de la campagne de mesure. Du fait de cette trop courte période d'enregistrement cet équipement n'apparaît pas sur l'histogramme, mais l'extrapolation annuelle de sa consommation serait de **550 kWh/an**. Une vigilance particulière sera portée à l'utilisation de ce serveur de calcul.

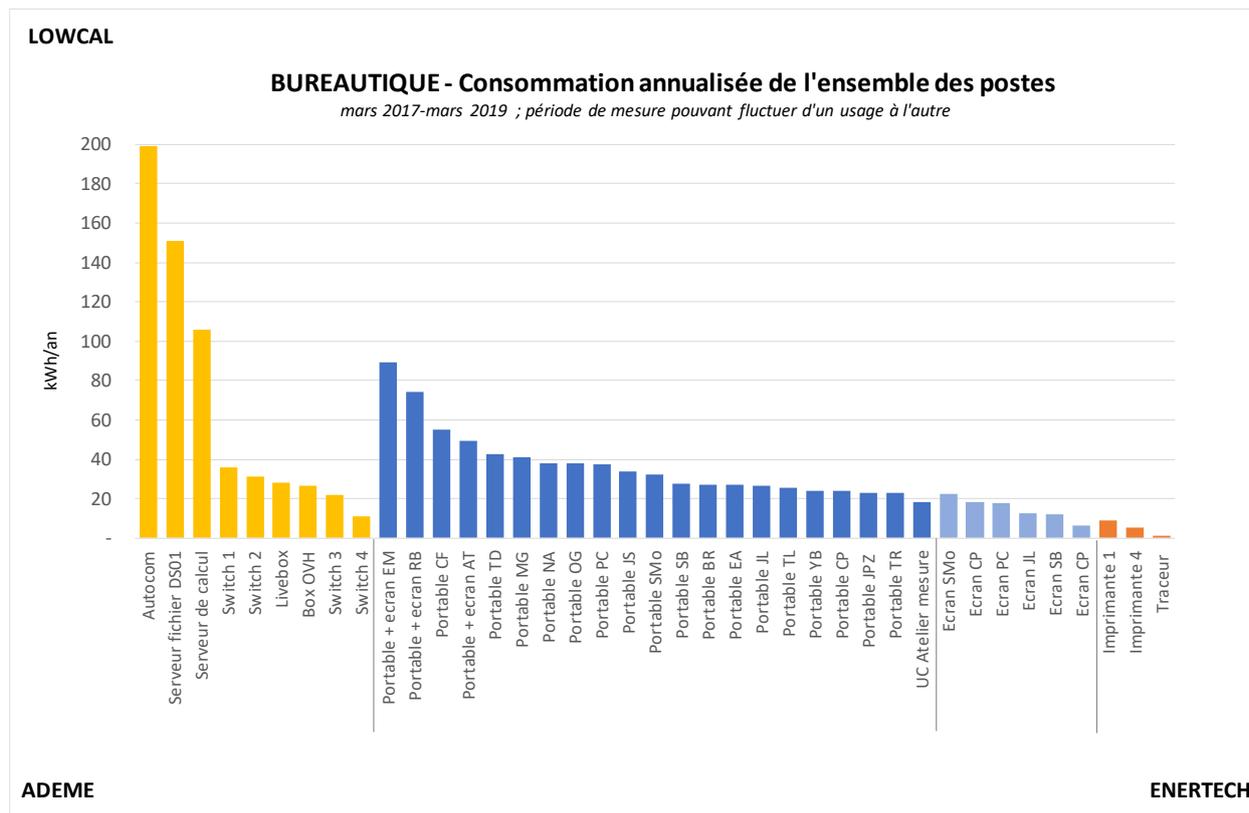


Figure 23 : Histogramme des consommations de bureautique de LowCal par équipement.

4.3.4 Profil de fonctionnement

La Figure 24 présente le diagramme d’intermittence ainsi que le profil de fonctionnement de l’usage bureautique (tous équipements agrégés). On remarque que l’augmentation de consommation s’accompagne d’une légère augmentation de la plage horaire de fonctionnement, notamment avec l’ajout du serveur de calcul et le fonctionnement nocturne du serveur mail, de plus en plus fréquent avec l’augmentation du télétravail.

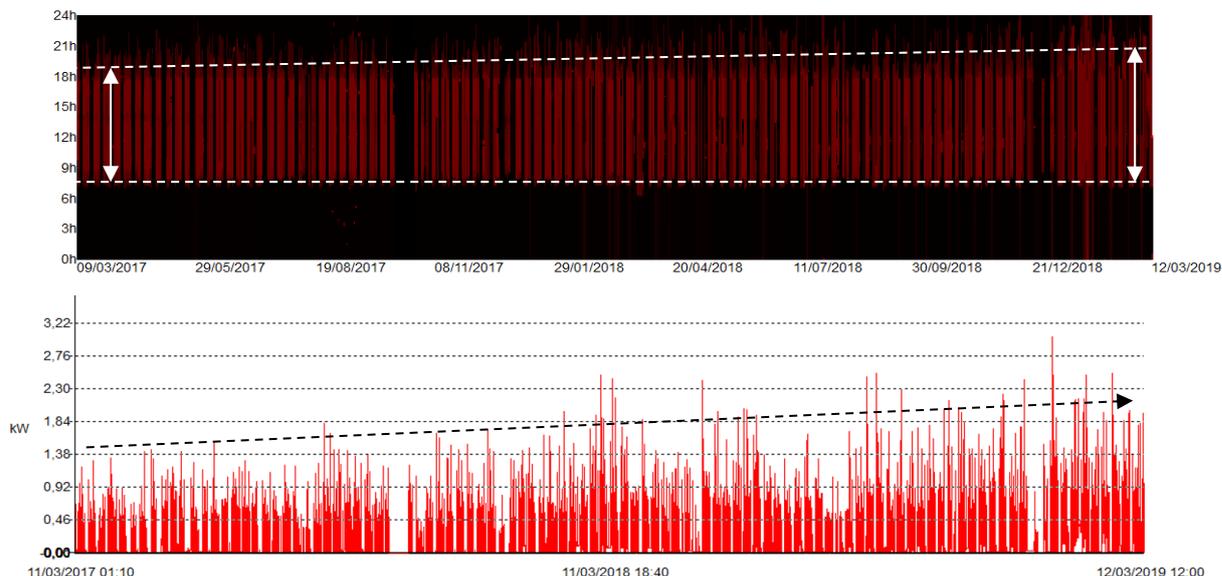


Figure 24 : Diagramme d’intermittence et profil de puissance de l’usage bureautique (mars 2017 – mars 2019)

Les consommations d'électricité en inoccupation demeurent globalement nulles, ce qui contribue fortement au résultat spectaculairement faible de l'usage bureautique à LowCal.

4.3.5 Evolution de la consommation mensuelle

La Figure 25 illustre l'évolution des consommations mensuelles de la bureautique. On observe sans surprise une corrélation de la consommation avec l'occupation du bâtiment (via l'indicateur du nombre d'équivalents temps plein).

On constate notamment les baisses de consommations liées aux vacances de Noël et d'été. On notera aussi une augmentation sensible de la consommation durant les 2 derniers mois de la campagne, liée au départ « PC Rouge R+1 Est », circuit sur lequel a été raccordé un serveur de calcul (Cf. §4.3.3).

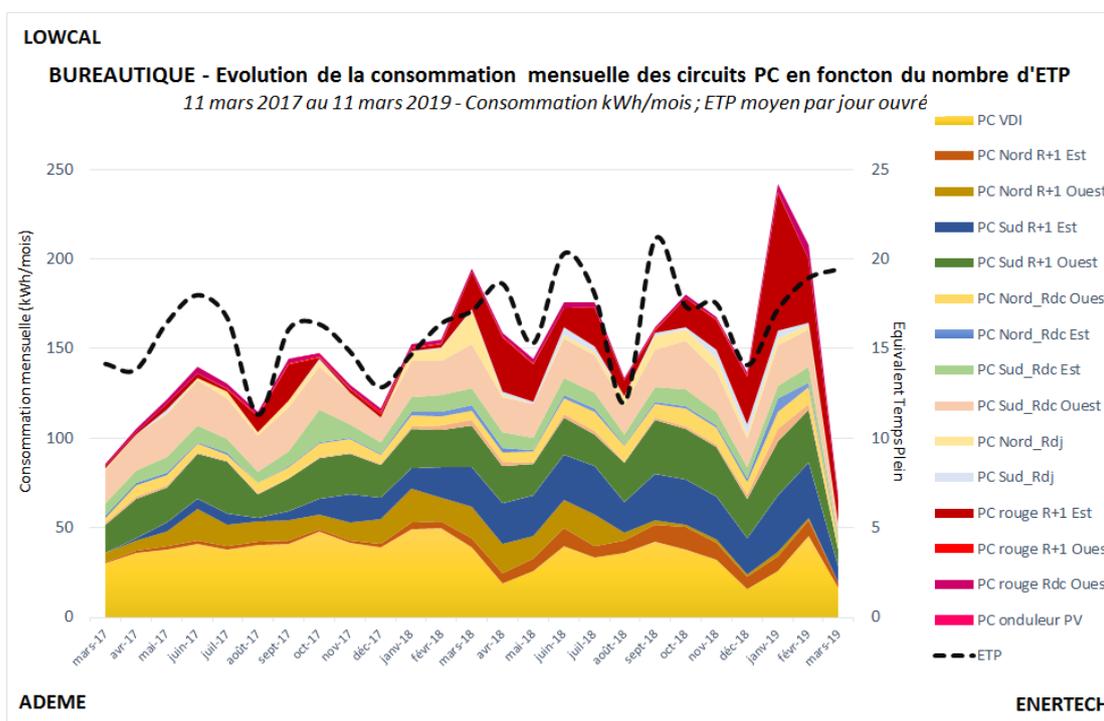


Figure 25 : Evolution de la consommation mensuelle de la bureautique par circuit.

Le graphique en Figure 26 présente la consommation moyenne mensuelle de la bureautique par équivalent temps plein. La moyenne observée est de l'ordre de 9 kWh_{éi}/mois/ETP. Le pic observé au mois de janvier 2019 est lié à la mise en service du serveur de calcul branché sur le circuit PC rouge R+1 Est. Cette consommation diminue le mois suivant.

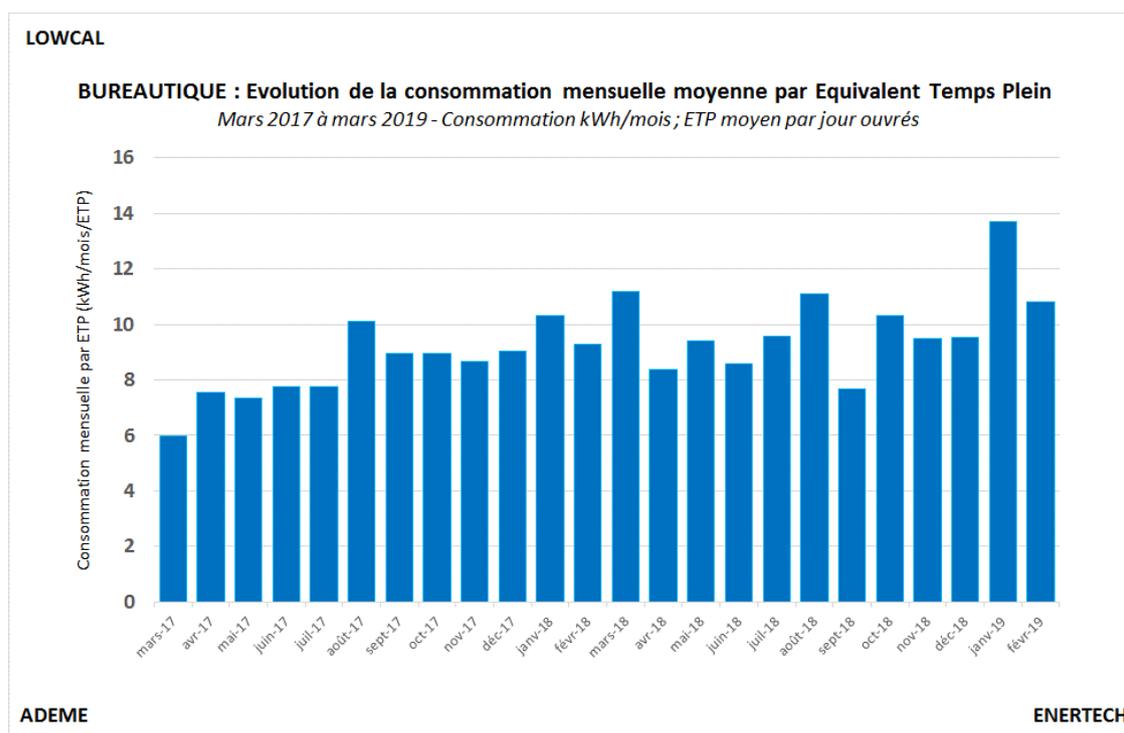


Figure 26: Evolution de la consommation mensuelle de la bureautique par ETP.

4.4 Eclairage

4.4.1 Description de l'installation

La liste des luminaires LED utilisés dans le bâtiment est présentée en Figure 27. La puissance moyenne installée dans les locaux est de 2 W/m².

<p>Bureaux luminaire led Sylvania RanaLed 21 W 2000 lm efficace</p>	<p>Locaux divers de passage : SFEL Tumo Led 10 W 1000 lm efficace</p>
	
<p>Circulations : récupération de Downlight avec Lampes Fluocompacts 26 W 1500 lm efficace</p>	<p>Locaux techniques stock ateliers : SFEL RGA avec tube led 25 W 2200 lm efficace</p>
	

Extérieur : SFEL Tumo 10 W 1000 lm + détection HF 1 W de veille	Salle de réunion : Récupération de luminaire avec lentilles microprismatiques gradables 1- 10 V avec sources T5 2 x 35 W
	

Figure 27 : Luminaires LED utilisés dans le bâtiment LowCal.

Les différentes commandes d'éclairage sont :

- Un interrupteur simple allumage pour chacun des bureaux ;
- Un interrupteur avec variateur de luminosité pour l'éclairage de la grande salle de réunion ;
- Des minuteries réglées sur 2 minutes pour l'éclairage des circulations et escaliers (3 circuits)
-

4.4.2 Consommation mesurée

L'éclairage du bâtiment LowCal représente 9 % de la consommation totale d'électricité avec une consommation de 475 kWh_{él} soit 0,65 kWh_{él}/m²_{SHON}/an.

La Figure 28 compare différentes consommations d'éclairage de bâtiments de bureaux ayant fait l'objet d'une campagne de mesure réalisée par ENERTECH dans les 10 dernières années. Même si la comparaison immédiate entre deux bâtiments est toujours délicate cette comparaison permet d'appréhender le ratio de consommation d'éclairage exceptionnellement bas du bâtiment LowCal, lié à l'optimisation des sources mais aussi au comportement vertueux des usagers.

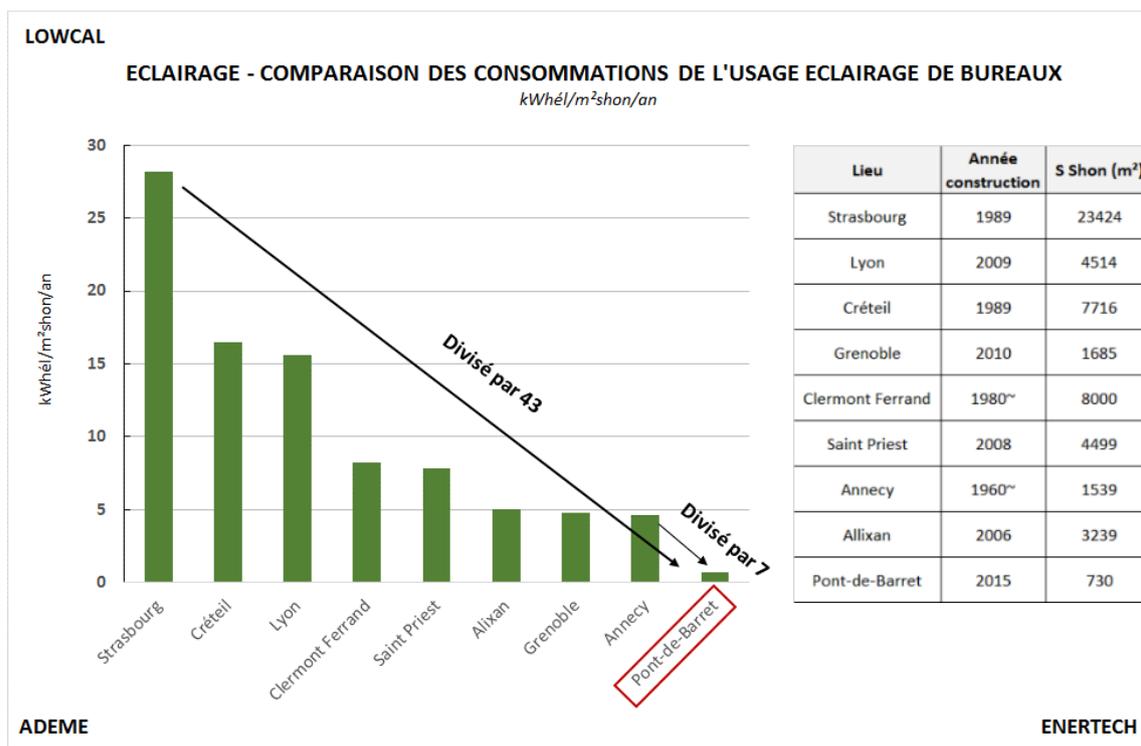


Figure 28 : Comparaison des consommations d'éclairage de plusieurs bâtiments de bureaux.

4.4.3 Profil de fonctionnement

Nous observons en Figure 29 le profil de fonctionnement de l'ensemble de l'éclairage du bâtiment pendant deux ans.

En semaine, les heures d'ouverture du bâtiment s'étalent en moyenne de 07h00 à 20h00, avec quelques dépassements occasionnels.

Plus globalement, les consommations d'électricité attribuées à l'éclairage en inoccupation (nuit, week-ends, jours fériés) sont nulles.

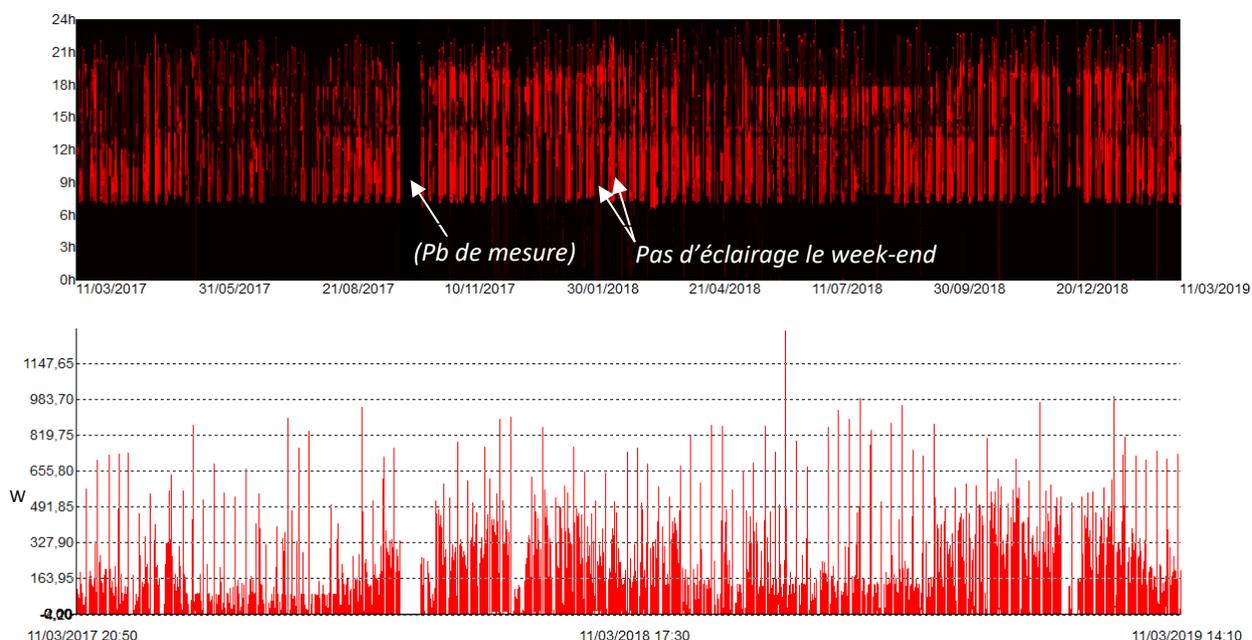


Figure 29 : Profil biennuel de puissance appelée par l'éclairage

4.4.4 Evolution des consommations mensuelles

La Figure 30 montre la saisonnalité de l'éclairage dans le bâtiment, à laquelle se superposent des fluctuations liées à l'occupation (évolution du nombre d'ETP). On voit toutefois que la consommation hivernale est globalement deux fois supérieure à la consommation estivale.

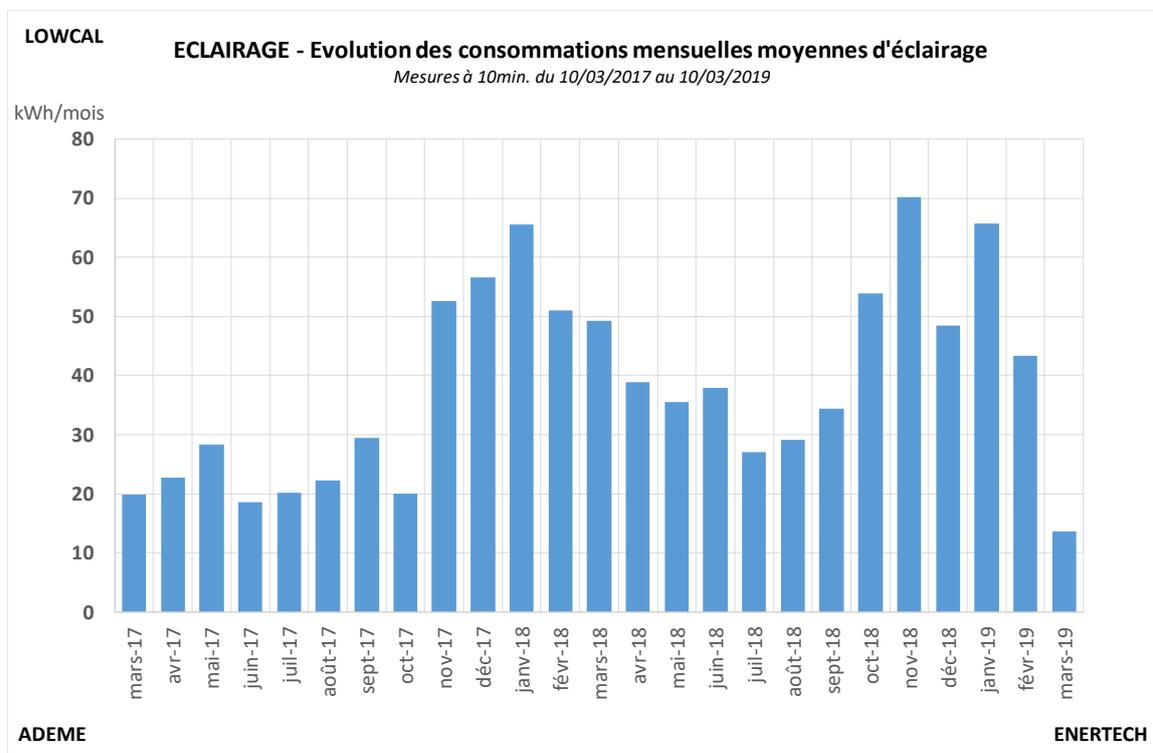


Figure 30 : Evolution des consommations mensuelles d'éclairage à LowCal.

4.4.5 Répartition de la consommation vue du TGBT

La Figure 31 illustre la répartition des consommations d'éclairage par circuit, vue du TGBT. Près d'un tiers de la consommation d'éclairage provient du départ RdC Ouest, représentant pourtant moins de 15 % de la surface du bâtiment. Une action est en cours dans le bureau concerné pour réorganiser le circuit d'éclairage de manière à en relocaliser le besoin.

On notera que la consommation de l'éclairage des circulations est égale à celle des BAES . L'éclairage des circulations est en effet très peu utilisé.

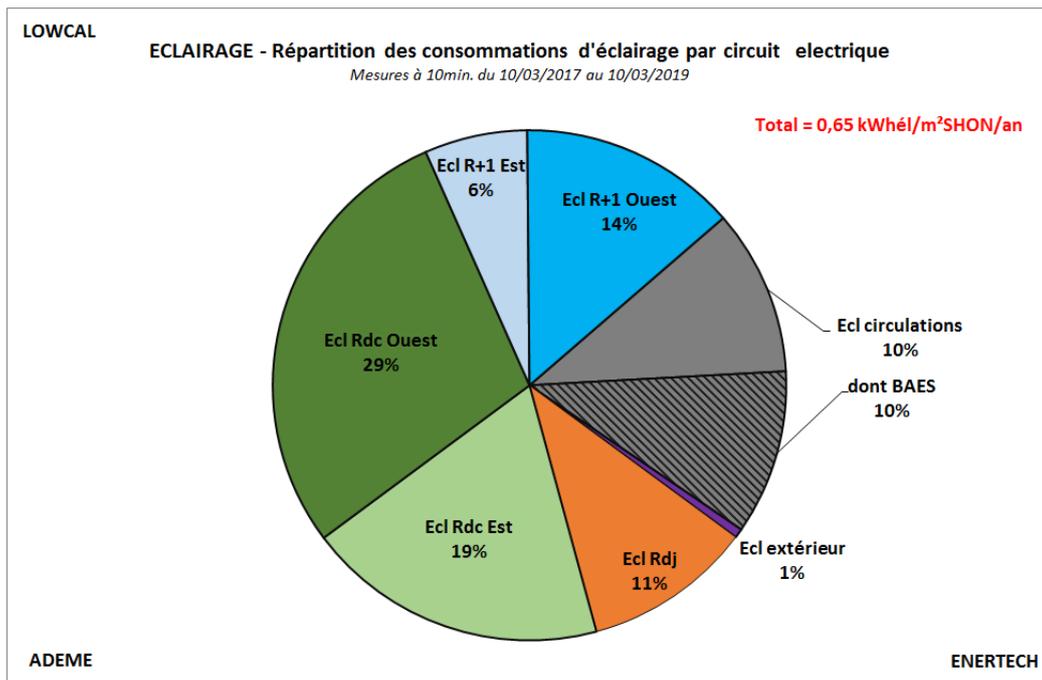
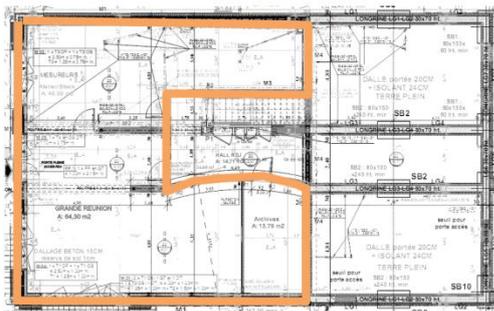
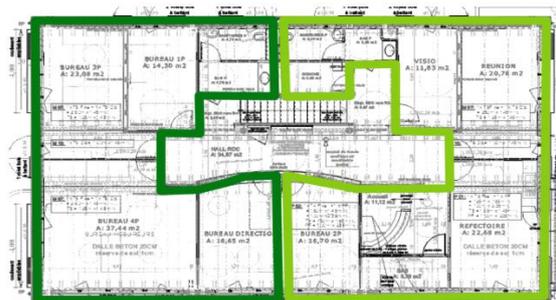


Figure 31 : Répartition des consommations par circuit d'éclairage.

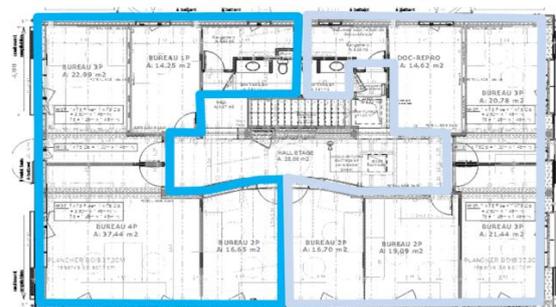
RdJ



RdC



R+1



4.4.6 Répartition de la consommation par pièce

Dans les calculs physiques et simulations réalisées en conception, les durées de fonctionnement annuelles d'éclairage prises en compte par typologie de pièce étaient les suivantes :

Bureau : 400h/an	Salle de réunion et atelier : 200h/an	Circulation : 200h/an	Réfectoire et WC : 200h/an
------------------	---------------------------------------	-----------------------	----------------------------

La Figure 32 montre que les durées mesurées sont proches de ces valeurs dans les locaux périphériques (salles de réunions, réfectoire, circulations) avec une moyenne mesurée de 190

heures. Elles sont plutôt supérieures dans les locaux d'usages (bureaux, atelier) avec une moyenne mesurée de 630 heures.

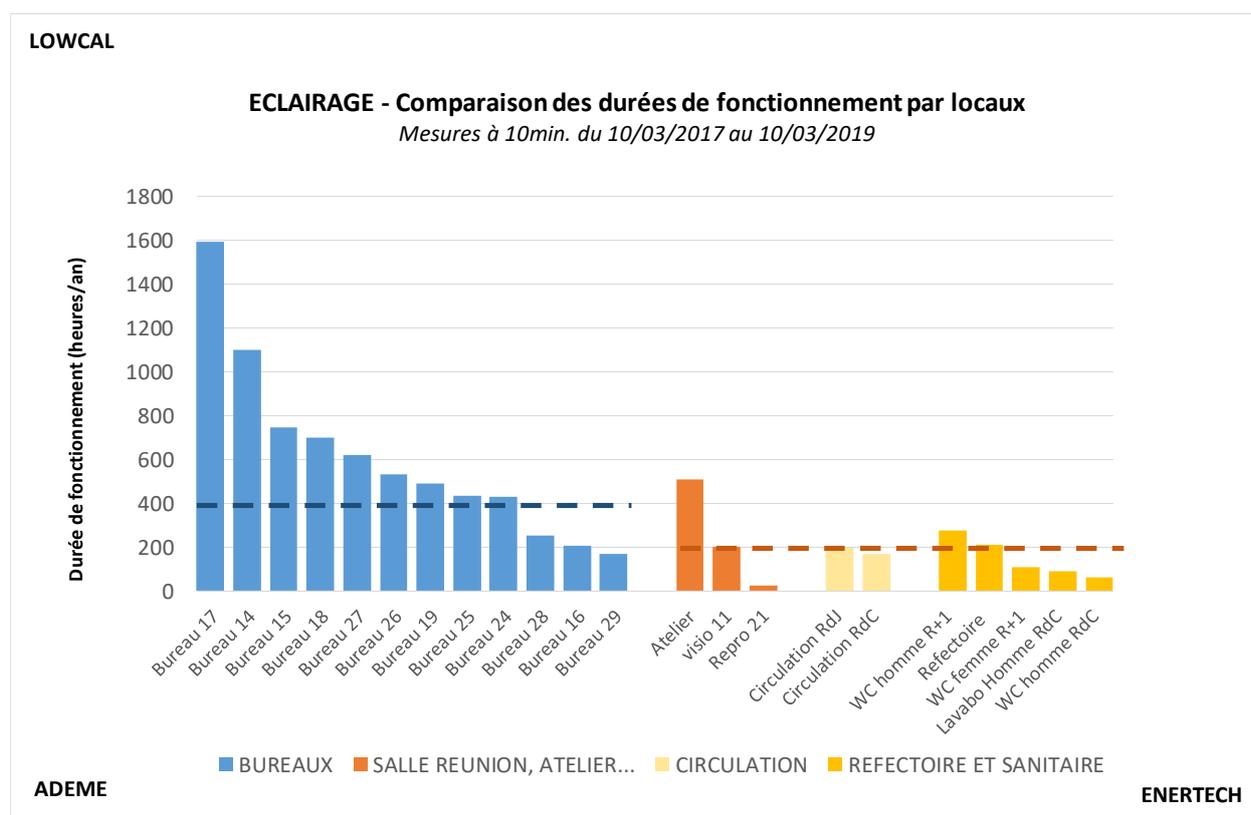


Figure 32 : Durées de fonctionnement d'éclairage mesurées dans les différents locaux du bâtiment.

Le tableau suivant reprend les principales caractéristiques de l'éclairage par local.

		Part sur le total Ecl	Temps de fonct. (h/an)	P installée (W)	Surface (m ²)	W/m ²	
Circulations	LM Circulation RdC	5,9%	170 h	186	36	5,2	
	LM Circulation RdJ	5,8%	195 h	160	33	4,8	
Ecl Rdj	LM Atelier	7,1%	508 h	75	49	1,5	
	LM Salle Reunion 02	3,8%	72 h	280	64,3	4,4	
RdC	Ecl RdC Est	LM visio 11	1,6%	203 h	42	11,6	3,6
		LM Refectoire 13	1,9%	209 h	50	22,7	2,2
		LM Bureau 14	4,3%	1101 h	21	11,2	1,9
		LM Bureau 15	5,8%	747 h	42	16,7	2,5
	Ecl RdC Ouest	LM Bureau 16	1,2%	205 h	31	16,7	1,9
		LM Bureau 17	21,7%	1596 h	73	37,5	1,9
		LM Bureau 18	5,5%	702 h	42	23	1,8
		LM Bureau 19	2,8%	491 h	31	14,3	2,2
		LM Lavabo Homme RdC	0,2%	88 h	10	4,7	2,1
		LM WC homme RdC	0,1%	61 h	10	4,7	2,1
R+1	Ecl R+1 Est	LM Repto 21	0,1%	23 h	31	14,6	2,1
		LM Bureau 24	3,3%	429 h	42	19,1	2,2
		LM Bureau 25	3,4%	435 h	42	16,72	2,5
	Ecl R+1 Ouest	LM WC femme R+1	0,2%	109 h	10	4,9	2,0
		LM WC homme R+1	0,5%	277 h	10	4,9	2,0
		LM Bureau 26	4,2%	534 h	42	16,6	2,5
		LM Bureau 27	8,4%	622 h	73	37,4	2,0
LM Bureau 28	1,5%	254 h	31	23	1,3		
LM Bureau 29	1,0%	169 h	31	14,2	2,2		

Tableau 5 : Durées annuelles d'éclairage mesurées par pièce dans le bâtiment LowCal.

4.5 Eau Chaude Sanitaire

4.5.1 Description de l'installation

La production d'ECS sert à l'alimentation en eau chaude de deux points de puisage situés au RDC : une douche individuelle et un évier dans le réfectoire. Cette production est assurée en base par un chauffe-eau classique à effet joule de capacité 75 litres et plus ponctuellement par un système instantané avec récupération de chaleur (prototype « *LaDouche* » en cours d'expérimentation dans nos bureaux) qui, lorsqu'il a fonctionné, s'est substitué au chauffe-eau.

Le chauffe-eau à effet joule utilisé est un modèle vertical mural de marque Thermor et de capacité 75 L. Il est commandé par un interrupteur placé dans le local douche. Il ne possède qu'une seule patte de fixation en partie haute et a été monté sur un châssis bois afin de faciliter la pose d'une isolation additionnelle. Nous estimons que la jaquette isolante ISOSTEN mise en place le 14/09/2017 permet un gain de l'ordre de 150 kWh_{él}/an qui représente le quart des pertes statiques (voir détails en Annexe1). Le chauffe-eau se trouve dans un placard à température ambiante du bâtiment.



Chauffe-eau à effet joule 75l



Jaquette isolante mise en place le 14/09/2017

Le chauffe-eau a été muni d'une sonde de température PT1000 qui se trouve en contact avec la cuve en acier et permet de connaître la température de l'eau stockée en partie haute. Cette sonde est reliée à un afficheur déporté sur la paroi du local. Ce dispositif a permis de régler finement la température de stockage au plus juste pour en limiter les pertes.

Le **système *LaDouche*** mis en place est un prototype développé par l'entreprise SOLABLE et commercialisé par QUANTIA. Ce système permet de produire une douche instantanée avec une puissance de 3 kW_{él} grâce à un échangeur à plaques et une pompe de relevage des eaux usées. Le système a été utilisé de mi-juillet à mi-novembre 2017 et a fait l'objet d'une étude spécifique jointe en annexes (voir Annexe 2).

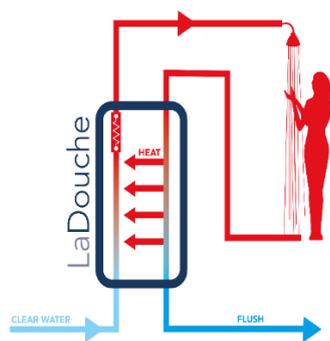


Schéma de principe du système « LaDouche »



Système « LaDouche » en place à LowCal

4.5.2 Consommation mesurée

La production d'Eau Chaude Sanitaire représente 5 % de la consommation totale du bâtiment avec 271k Wh_{él}/an soit 0,37 kWh_{él}/m²_{shon}/an. Cette consommation est réalisée à 95 % par le chauffe-eau à effet joule, l'utilisation du système instantané étant pour le moment limitée à 3 mois d'utilisation sur la durée de la campagne.

4.5.3 Profil de fonctionnement

La Figure 33 montre que la production d'ECS est bien asservie à l'interrupteur général de coupure. On constate aussi que, sur la première moitié de la période de mesure, la commande par interrupteur (placé dans le local douche) est effective, avec une plage de fonctionnement qui se limite aux besoins. Depuis fin 2017 le choix a été fait d'optimiser la température de stockage et de laisser le fonctionnement permanent aux heures de présence. Seul le contacteur général d'alimentation du bâtiment permet la coupure du ballon. Ce changement de réglage est en partie lié à une utilisation plus intensive de la douche du fait d'un nombre croissant de collaborateurs utilisant le vélo depuis leur domicile.

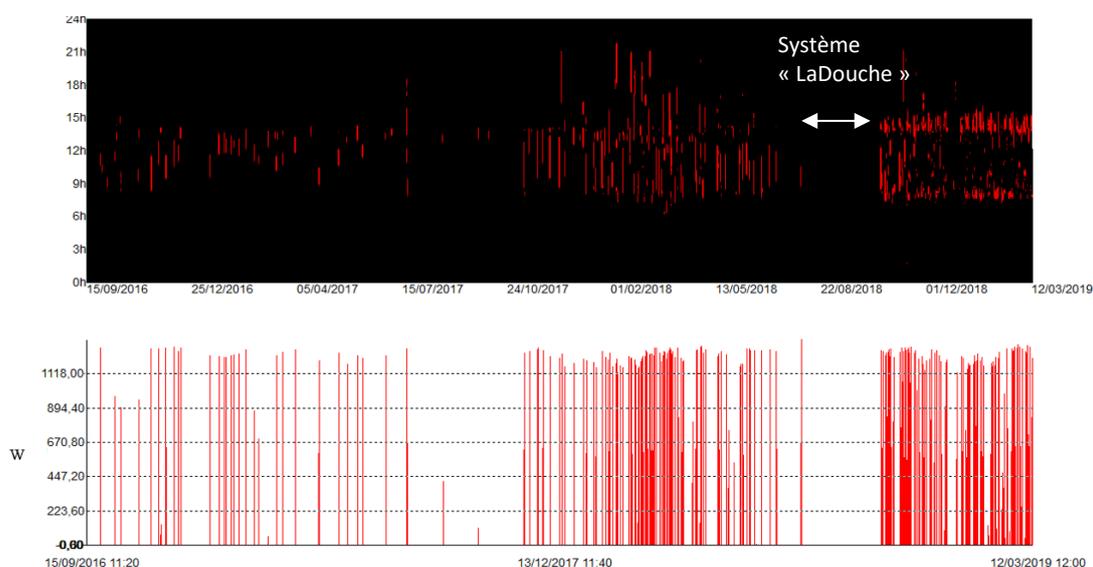


Figure 33 : Profil biannuel de puissance appelée par la production ECS (chauffe-eau effet joule).

4.5.4 Evolution des consommations mensuelles

La Figure 34 montre l'augmentation sensible de la consommation d'ECS au cours de la campagne, liée à une intensification de l'usage.

La baisse des consommations observée de juillet à septembre 2018 s'explique par un taux d'occupation plus faible du bâtiment et surtout par la mise en route du système *LaDouche* qui permet une annulation des pertes statiques et une division par 3 de l'énergie puisée par douche.

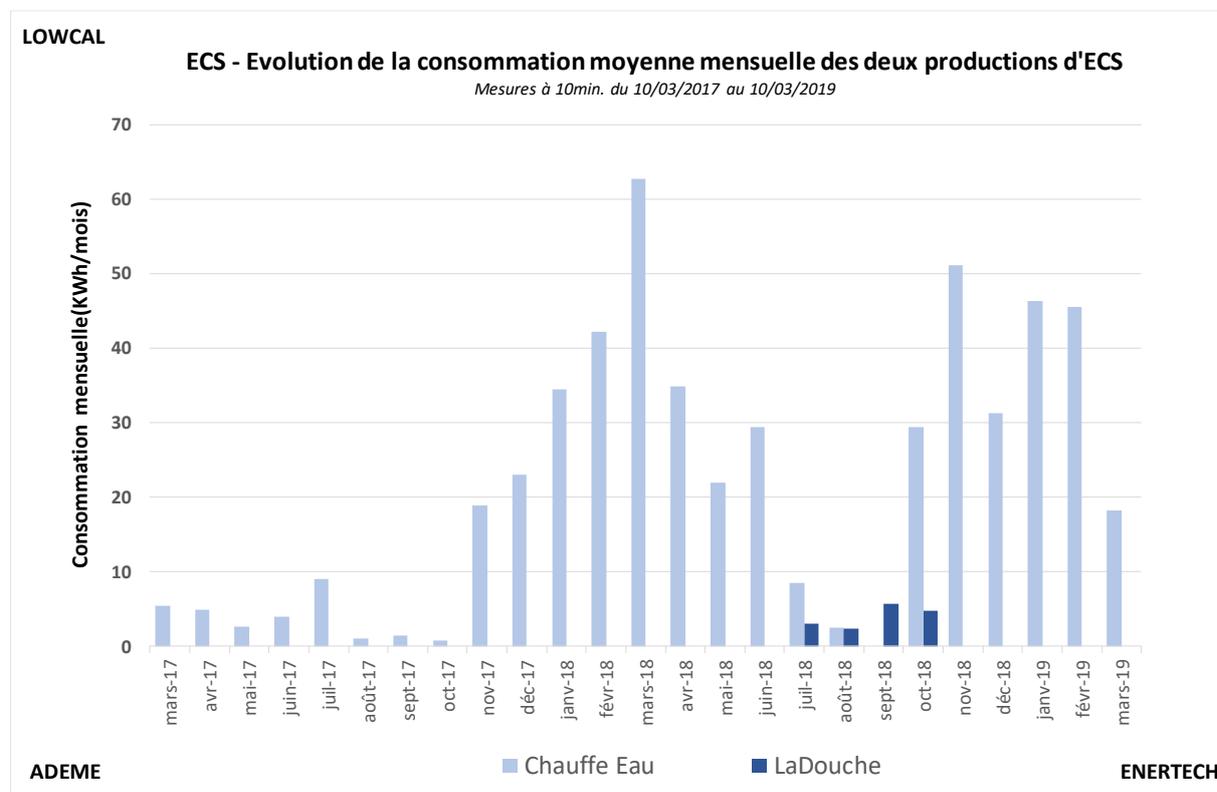


Figure 34 : Evolution des consommations mensuelles du poste ECS.

4.6 Cuisine-réfectoire

Le poste cuisine représente 6 % de la consommation totale du bâtiment avec 326 kWh_{él}/an soit 0,45 kWh_{él}/m²_{shon}/an.

Les équipements de cuisine se composent de deux fours micro-ondes, d'une cafetière et d'une bouilloire. La bouilloire est le premier poste de consommation devant les fours micro-ondes et la cafetière (Figure 35).

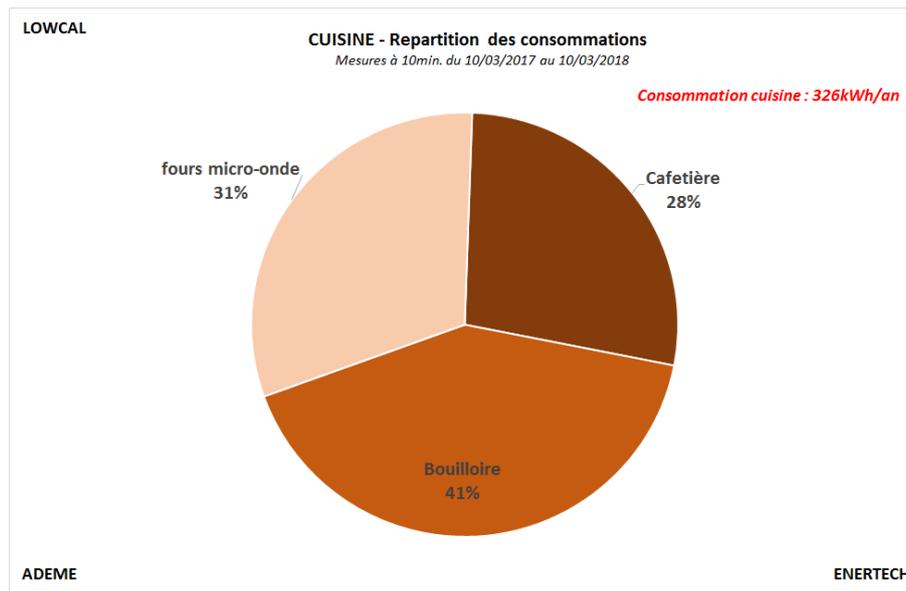


Figure 35 : Répartition des consommations du poste « cuisine-réfectoire ».

Les graphes suivants situent les plages d'utilisation de la bouilloire (8h-20h) de la cafetière (8h-15h) et des fours micro-ondes (13h-14h).

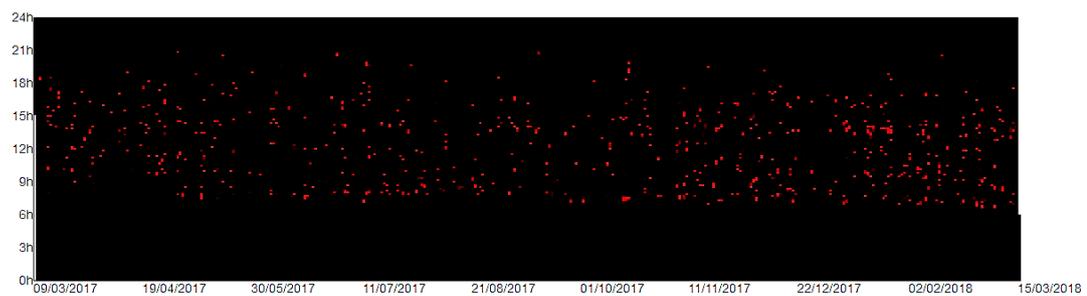


Figure 27 : Profil biennuel du fonctionnement de la bouilloire.

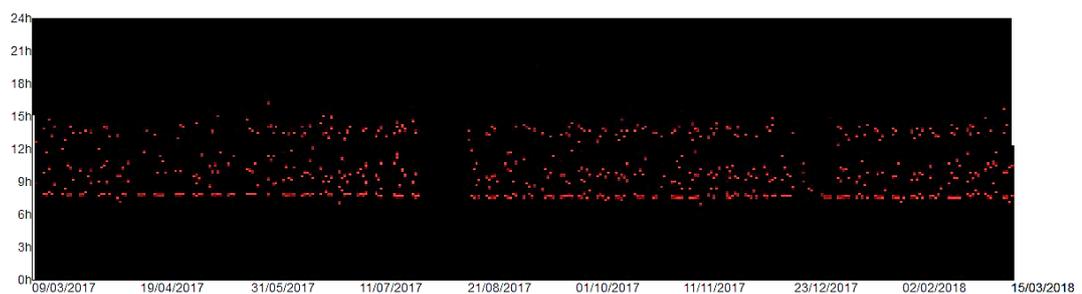


Figure 28 : Profil biennuel du fonctionnement de la cafetière.

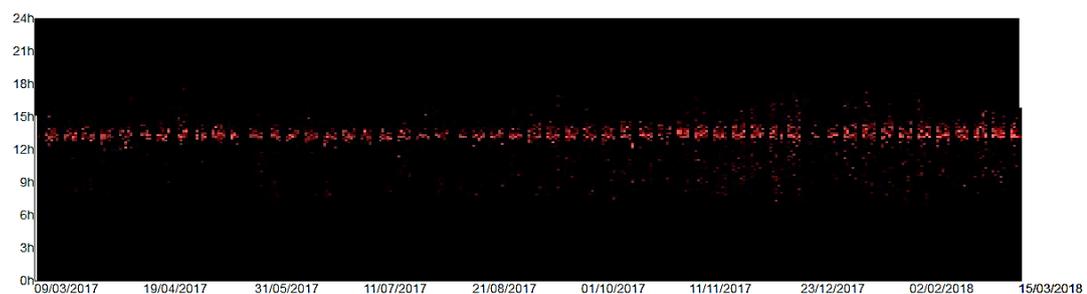


Figure 29 : Profil biennuel du fonctionnement des fours micro-ondes.

4.7 Ventilation

4.7.1 Description de l'installation

La ventilation est de type double flux décentralisée par pièce avec récupération de chaleur par échangeur à plaques (ComfoAir70 de chez Zehnder). Chaque caisson est commandé par un interrupteur simple allumage à voyant situé à l'entrée de la pièce (Figure 36). Chaque caisson dispose en façade d'un écran tactile permettant le choix entre 4 vitesses de fonctionnement.

Les bureaux disposent d'un ou plusieurs caissons de ventilation (21 caissons 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. Le phénomène a été mesuré et est étudié dans une note dédiée à l'étude de qualité de l'air dans le bâtiment LowCal.



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 36 : 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 chez Zehnder. Cette ventilation est très peu utilisée.

Le suivi des consommations électriques du poste ventilation a été réalisé avec le système Multivoie via les 5 départs électriques spécifiques du TGBT (CTA RdJ, Rdc Est, Rdc Ouest, R+1 Est, R+1 Ouest) ainsi que dans les tableaux divisionnaires et boîtes de dérivation pour un suivi bureau par bureau.

4.7.2 Consommation mesurée

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 37 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.

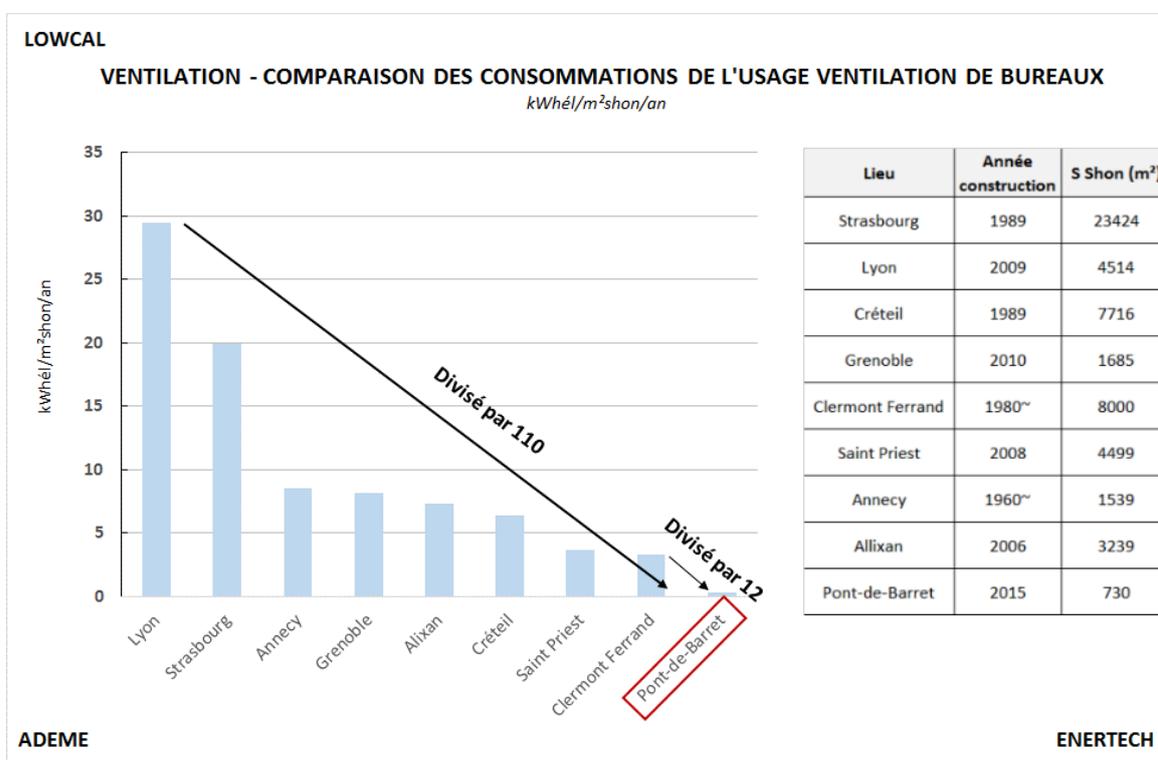


Figure 37 : Comparaison des consommations électriques du poste ventilation sur plusieurs bâtiments de bureaux.

Ce niveau spectaculairement faible de la consommation est rendu 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 intérieur 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.

4.7.3 Profils de fonctionnement

La Figure 38 illustre le profil de fonctionnement de l'ensemble des ventilations.

En semaine, les heures d'ouverture du bâtiment s'étendent globalement de 7h à 20h, 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.

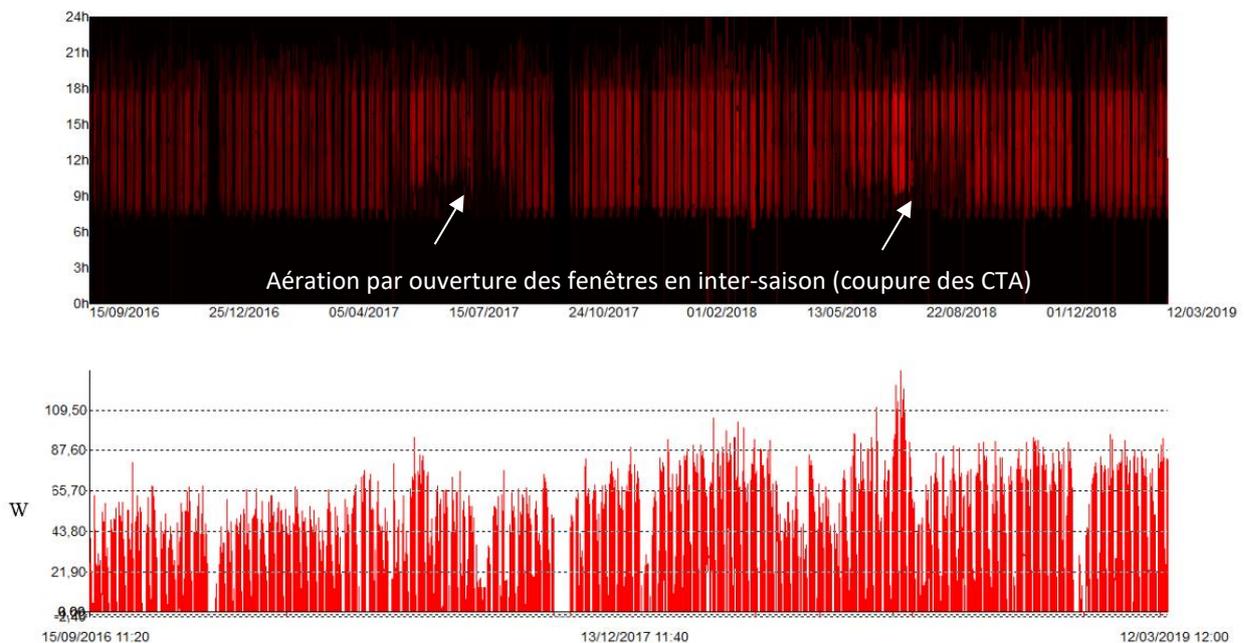


Figure 38 : Profil biannuel de puissance appelée par l'ensemble des caissons de ventilation.

4.7.4 Répartition des consommations (vues du TGBT)

La Figure 39 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 les locaux à usage discontinu : visioconférence, réfectoire, salle de réunion et reprographie.

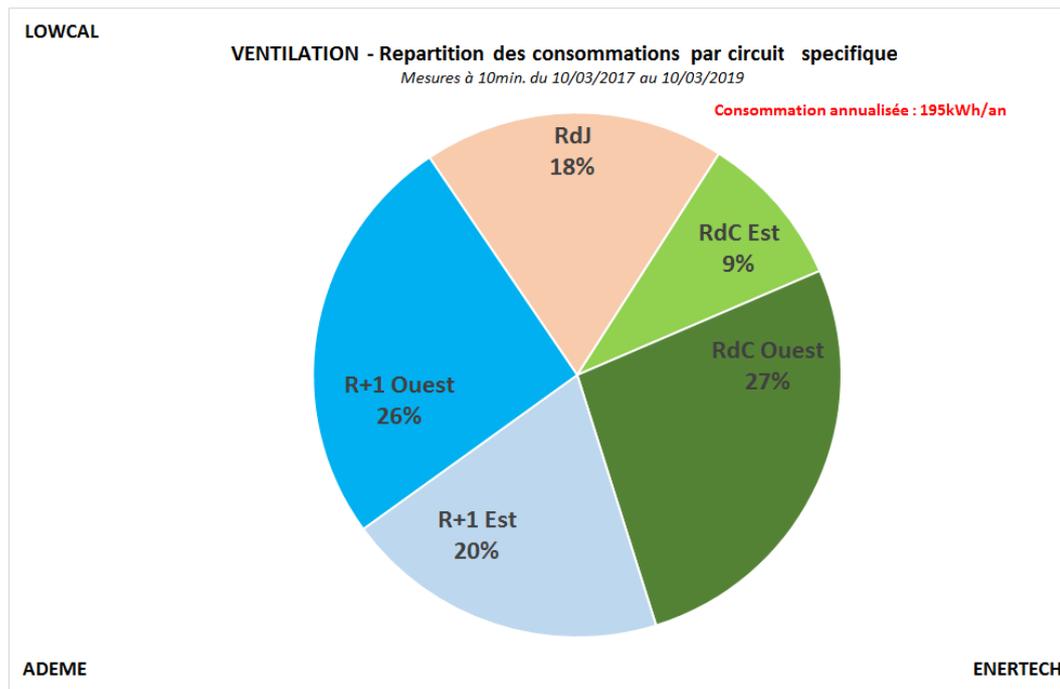


Figure 39 : Répartition des consommations de ventilation par zone.

4.7.5 Consommations et puissances appelées

Les graphiques en Figure 40 et Figure 41 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.

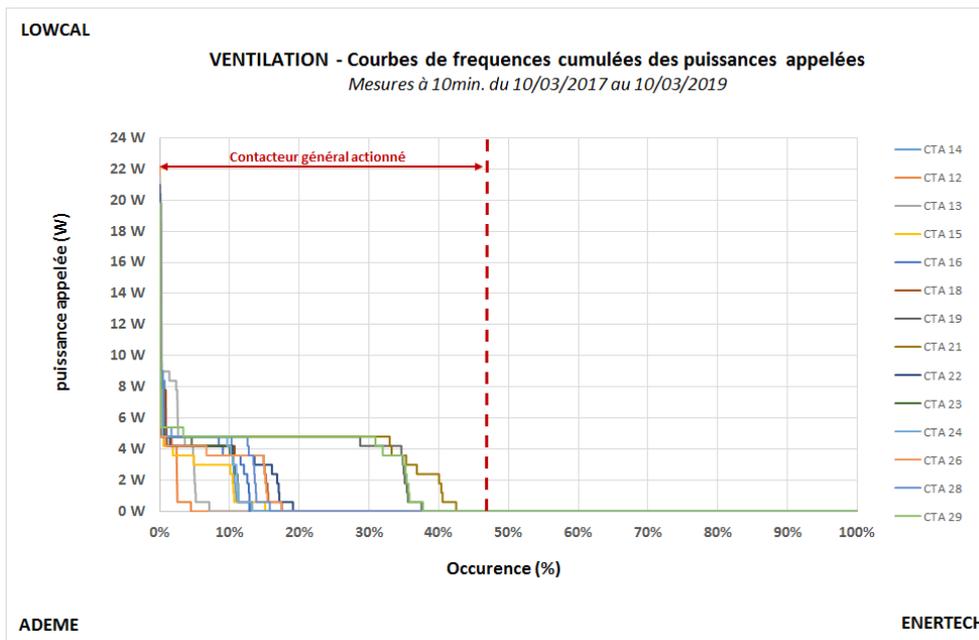


Figure 40 : Courbes de fréquences cumulées des puissances appelées par les caissons de ventilation.

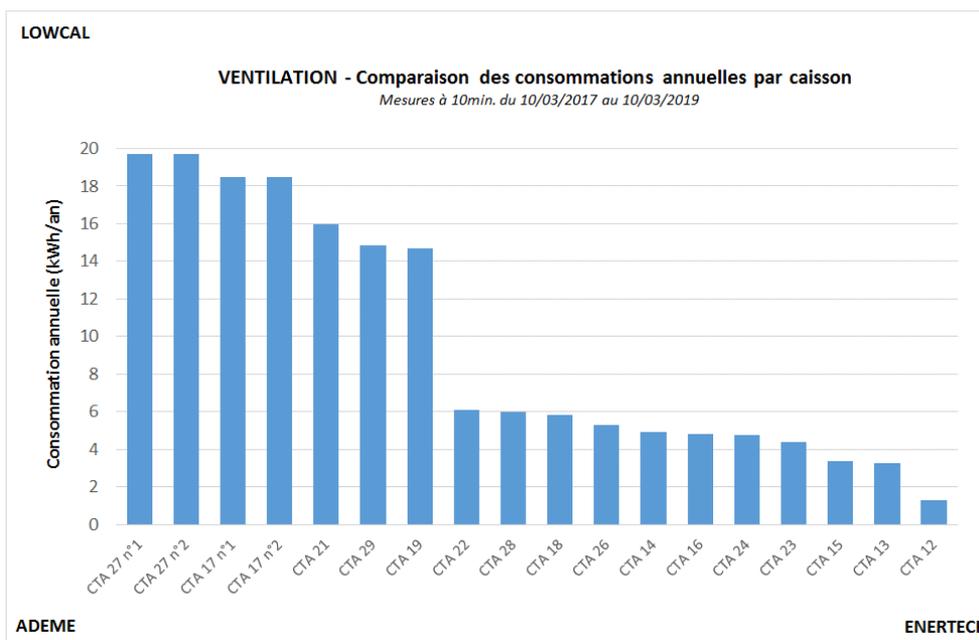


Figure 41 : Comparaison des consommations annuelles par caisson.

4.7.6 Débits et taux de renouvellement d'air

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

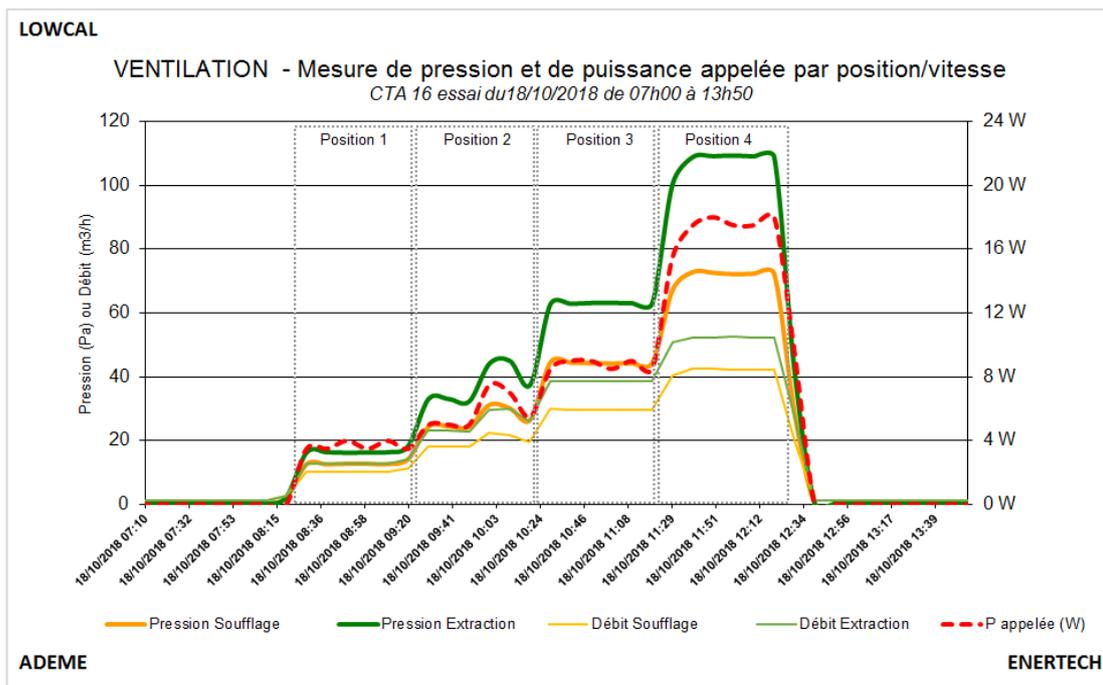


Figure 42 : Pressions, débits et puissances appelées aux différents niveaux de consigne (CTA n°16).

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

Vitesse 1 ≈ 3W	Vitesse 3 ≈ 8W
Vitesse 2 ≈ 5W	Vitesse 4 ≈ 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 m³/s transporté	La norme recommande des ordres de grandeur de puissances spécifiques énergétiquement intéressantes suivant le système installé :		
SFP1	... < 500 W par m³/s	Ventilateur	Application	Valeurs recommandées
SFP2	500 < ... < 750 W par m³/s			
SFP3	750 < ... < 1250 W par m³/s	d'air soufflé	système de climatisation	SFP1
SFP4	1250 < ... < 2000 W par m³/s		système de ventilation sans récupérateur de chaleur	SFP3
SFP5	2000 < ... W par m³/s	d'air extrait	système de climatisation et système de ventilation avec récupération de chaleur	SFP3
			système 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 pour 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 chacun des caissons et SFP moyens. (SFP par moteur 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).

Le Tableau 8 fournit les débits moyens de ventilation par bureau en condition réelle 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.

Le rapport de mesures de qualité d'air intérieur des bureaux, réalisé en octobre 2017 par MEDIECO, indique néanmoins que « les valeurs relatives 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 (...). »

Le rapport ajoute toutefois que « 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 ». Certains occupants ouvrent donc la fenêtre quelques minutes en arrivant le matin de manière à évacuer ces polluants.

	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 : Débits moyens et taux de renouvellement d'air par bureau.

4.8 Production photovoltaïque

4.8.1 Bilan brut de la production

La production d'électricité est assurée par 153 m² de capteurs photovoltaïques PW2500F de marque Photowatt (23,7 kWc) disposés en toiture et orientés plein sud sans ombrage sensible. La production est injectée sur le réseau et vendue en totalité.

Sur les deux années de mesures, l'installation photovoltaïque a produit 65,8 MWh_{él} alors que le bâtiment n'en a consommé que 10,5 MWh_{él} (Figure 43). **LowCal produit ainsi 6 fois plus d'énergie qu'il n'en consomme, tous usages confondus.**

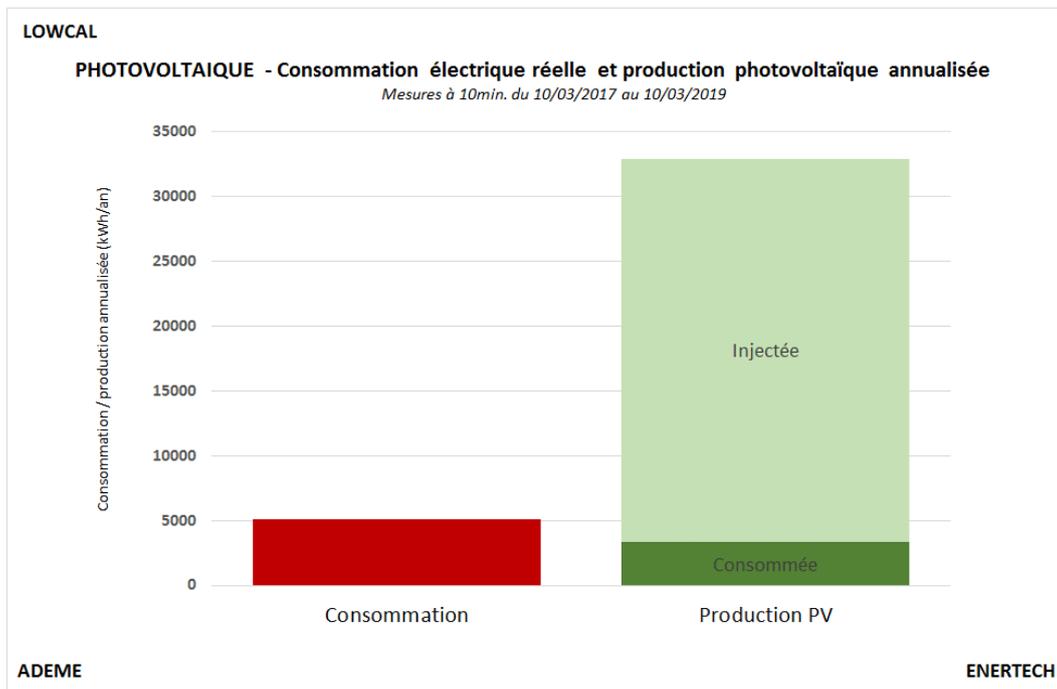


Figure 43 Consommation et production photovoltaïque (mars 2017 à mars 2019).

Le nombre d’heures de production à puissance crête est, en moyenne annuelle, de 1390 h sur les deux années, ce qui est totalement conforme aux prévisions compte tenu de l’irradiation solaire moyenne mesurée sur l’horizontale de 1550 kWh/m² par la station météo du bâtiment (Figure 44).

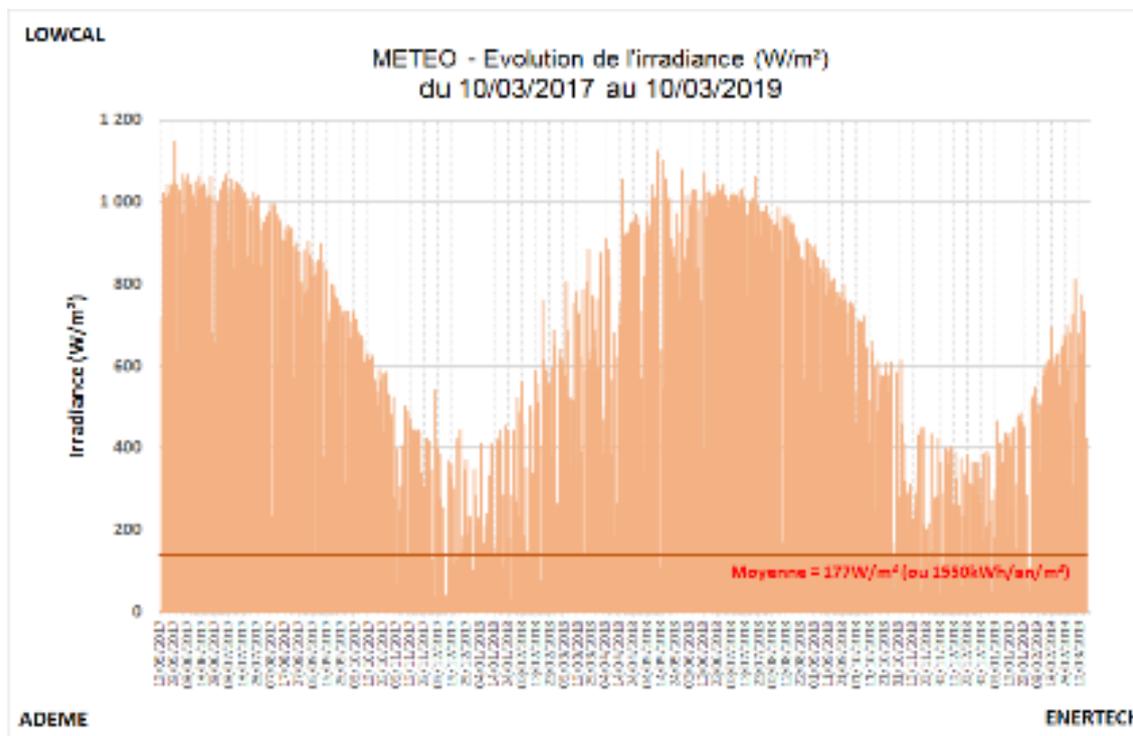


Figure 44 : Irradiance solaire mesurée par la station météo fixée sur le bâtiment LowCal. Energie reçue sur l’horizontale entre mars 2017 et mars 2019 : 1550 kWh/m²/an.

4.8.2 Autoproduction et autoconsommation

L'installation solaire étant en vente totale, on ne peut pas parler d'autoconsommation au sens classique du terme. Il est toutefois intéressant d'approcher la question dans la mesure où :

- Une installation avec autoconsommation et vente du surplus aurait pu être envisagée.
- L'énergie électrique suit *physiquement* le chemin le plus court ce qui implique qu'une fois injectée en triphasé, elle revient en partie vers le bâtiment si ce dernier consomme au même moment.

Le taux d'autoproduction est la part de la consommation d'électricité issue de l'installation PV sur la consommation totale. L'autoproduction reflète le niveau d'autonomie par rapport au réseau. S'il est égal à 66 %, cela signifie que 66 % de l'énergie consommée est d'origine renouvelable, les 34 % restants étant issus du réseau.

Le taux d'autoconsommation est la part de la production PV consommée sur la production totale. S'il est égal à 10 %, cela signifie que 10 % de la production a été consommée par le bâtiment, les 90 % restants ayant été injectés sur le réseau.

La Figure 45 illustre l'évolution mensuelle de la consommation et de la production électrique du bâtiment. En parallèle sont tracés les taux d'autoconsommation et d'autoproduction.

- Le taux d'autoproduction global mesuré (à 10 minutes) est de 66 %.
- Le taux d'autoconsommation global mesuré (à 10 minutes) est de 10 %.

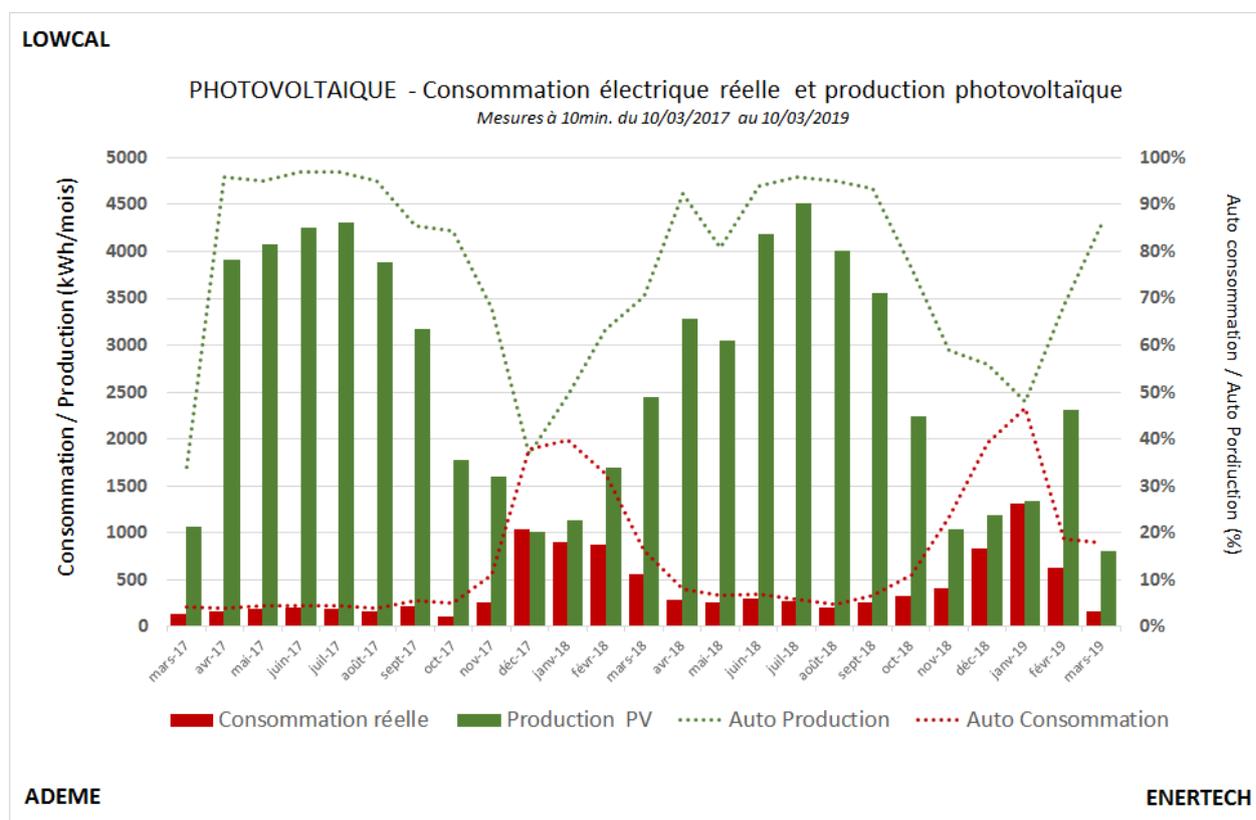


Figure 45 : Evolution de la consommation et de la production électriques mensuelles du bâtiment.

4.8.3 Lien avec la mobilité électrique

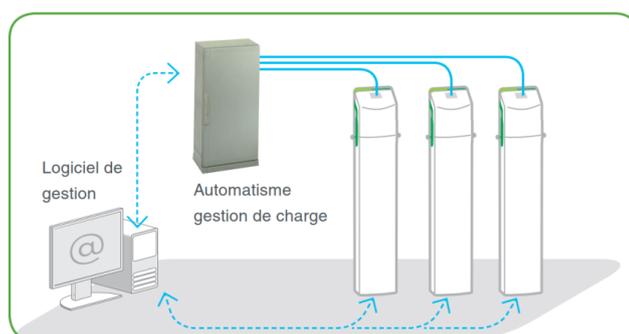
L'énergie injectée durant les jours ouvrés (08h00-18h00 ; hors week-end, vacances de Noël et jours fériés) est de 19 MWh_{él} par an, soit 78 kWh_{él} par jour ouvré.

Si l'on considère une consommation automobile moyenne de 17,5 kWh_{él}/100km (information recueillie sur le site de l'ADAC⁹, Cf Tableau 8), cette énergie permettrait d'effectuer en moyenne 108 570 km/an¹⁰.

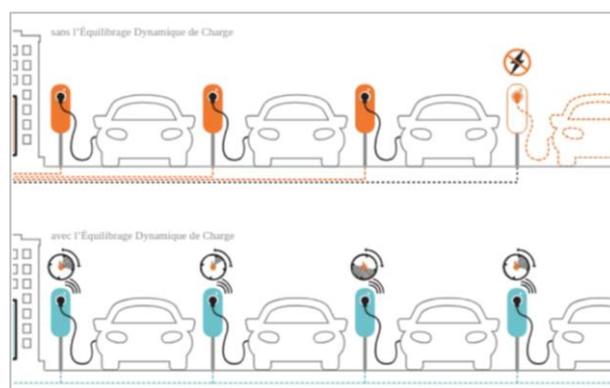
Un sondage, effectué en interne, a montré que les 23 salariés d'ENERTECH parcourent 55 350 km/an pour effectuer le trajet quotidien domicile-travail. A cela s'ajoutent près de 62 000 km/an effectués par les deux véhicules de fonction pour les déplacements professionnels.

LowCal pourrait donc (de manière assez théorique) subvenir quasiment à l'ensemble des besoins de transport de l'entreprise avec le surplus de production photovoltaïque et atteindre, selon nos calculs, un niveau d'autoproduction de 93 % et d'autoconsommation de 68 % (NB : le bâtiment ne serait en revanche plus « à énergie grise positive » si l'on affecte l'énergie excédentaire à la mobilité).

La concomitance réelle de l'énergie disponible avec les besoins de recharge des différentes batteries amoindrirait certainement ces chiffres. Une amélioration du dispositif via un système de gestion dynamique de la charge des véhicules, autorisant la charge seulement en cas de surplus et répartissant cette charge de manière optimale en fonction des distances à parcourir, permettrait toutefois de maximiser l'autoproduction en incluant la mobilité électrique.



Source : Schneider electric – Livre Blanc 2011-La gestion de la recharge des flottes de véhicules électriques



Source : Shell Group – NewMotion Dynamic Power Sharing (Équilibrage Dynamique de Charge)

⁹ ADAC : Allgemeiner Deutscher Automobil-Club. site : <https://www.adac.de/>

¹⁰ Le prise en compte de la totalité des jours de production (pas seulement les jours ouvrés) porte le calcul à 158 000 km/an. La prise en compte de l'énergie grise de la construction amortie sur 50 ans ramène cette valeur de 158 000km/an à 35 125km/an soit 30% de l'empreinte énergétique de la mobilité des salariés.

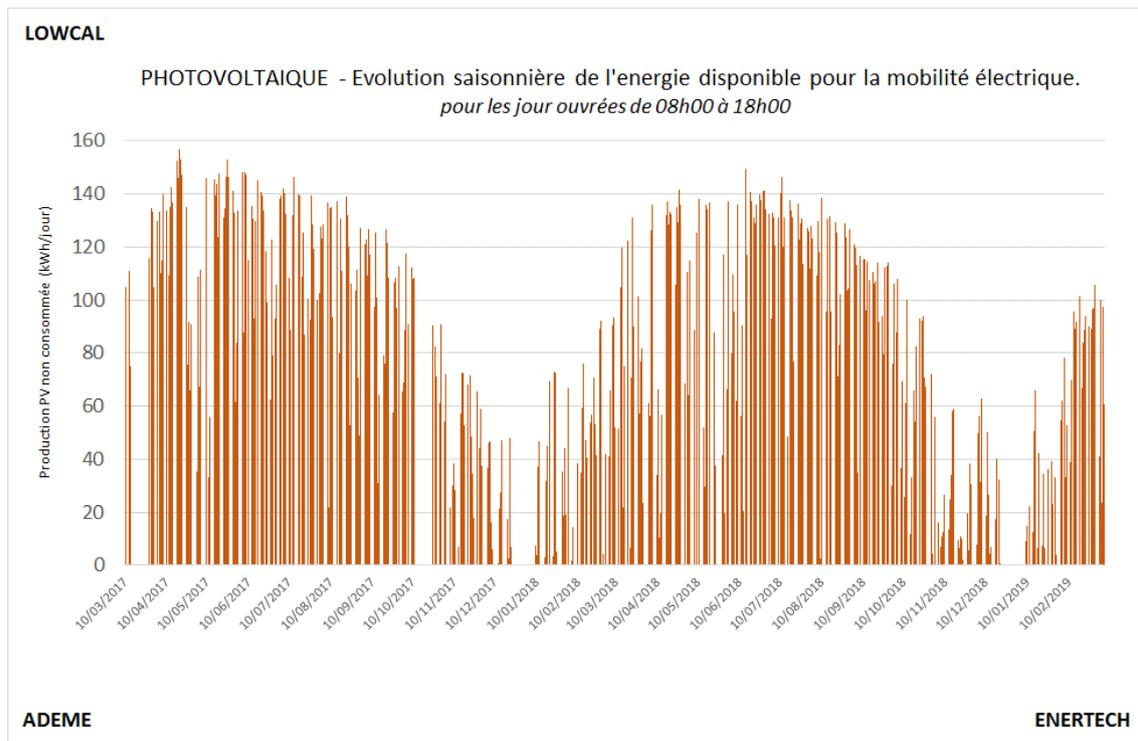


Figure 46 : Evolution de la production journalière disponible pour la mobilité électrique.

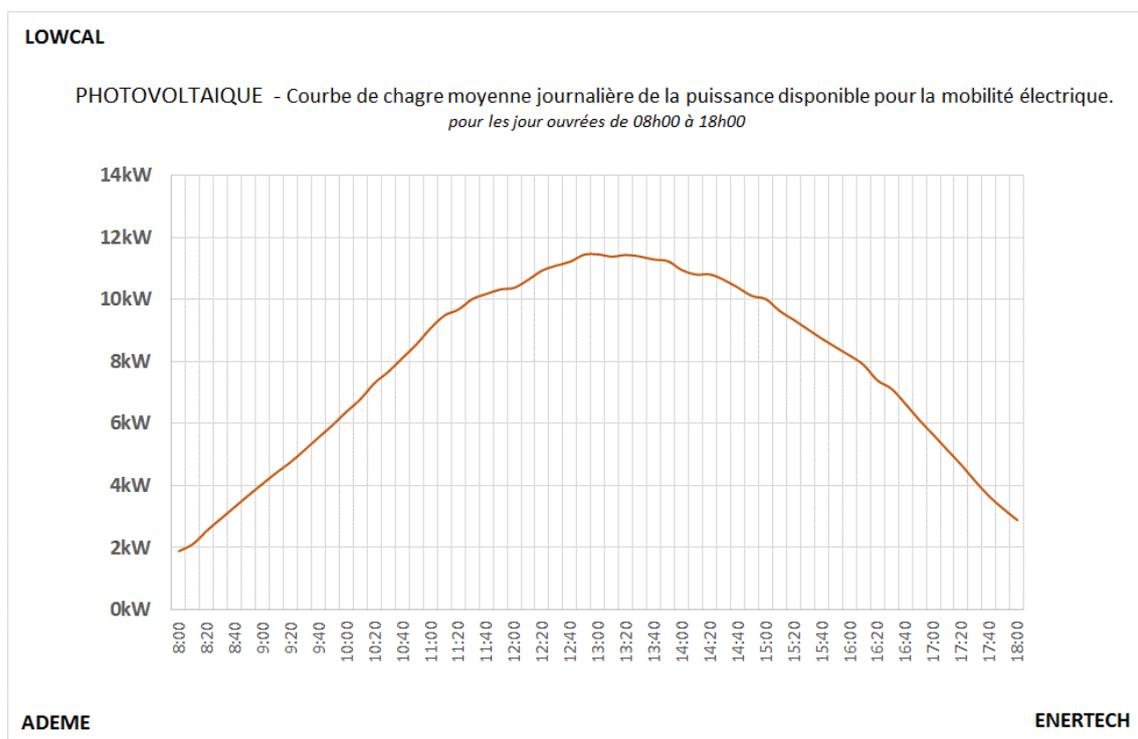


Figure 47 : Evolution de la production journalière disponible pour la mobilité électrique.

modèle	Consommation en ADAC Ecotest en kWh/100 km	Consommation Données du fabricant (NEDC) en kWh/100 km
Hyundai Ioniq Style électrique	14,7	11,5
VW e-Golf	17,3	12,7
BMW i3 (94 Ah)	17,4	12,6
Smart Fortwo Coupe EQ Prime	18,3	12,9
Tendance Hyundai Kona Electric (64 kWh)	19,5	14,3
Opel Ampera-e première édition	19,7	14,5
Renault Zoe Intens	20,3	13,3
Nissan Leaf I Acenta (30 kWh)	20,5	15,0
Nissan Leaf II Acenta	22,1	15,2
Tesla Model S P90D	24,0	20,0
Tesla Modèle X 100D	24,0	20,8
Nissan e-NV200 Evalia	28,1	25,9 (selon WLTP)

ADAC : Allgemeiner Deutscher Automobil-Club

NEDC : New European Driving Cycle

WLTP : Worldwide Harmonized Vehicle Test Procedure

Tableau 9 : ADAC Ecotest – Stromverbrauch bei e-autos.

5 ANNEXE 1 : Mesure des performances d'une jaquette isolante pour chauffe-eau individuel

5.1 Objectif du test

L'objectif de cette expérience est de déterminer par la mesure la réduction des pertes statiques d'un chauffe-eau à effet joule par la mise en œuvre d'une jaquette isolante.

Différents points de mesure ont été mis en place pour suivre la consommation électrique et les températures de stockage et d'interface. Plusieurs configurations d'isolation ont été testées, avec un minimum de 2 jours de mesure par configuration au pas de temps de 10 minutes.

Les mesures sont annualisées en considérant que les températures (stockage de l'eau chaude, ambiance du local) sont constantes.

5.2 Installation et métrologie

5.2.1 Le chauffe-eau

Le chauffe-eau utilisé est un modèle vertical mural de marque Thermor et de capacité 75 L (Figure 48). Il ne possède qu'une seule patte de fixation en partie haute. Il a été monté sur un châssis en bois facilitant la pose d'une isolation additionnelle. Il se trouve dans un placard ouvert donnant sur la salle de reprographie, local qui est à la température ambiante du bâtiment.



Figure 48 : Chauffe-eau utilisé pour la mesure.

Sur demande d'ENERTECH, le chauffe-eau a été équipé par l'installateur d'une sonde de température PT1000 en contact avec la cuve en acier, ce qui permet d'estimer la température de l'eau stockée en partie haute. Cette sonde est reliée à un afficheur déporté sur la paroi du local.

Les caractéristiques détaillées du chauffe-eau sont présentées dans le Tableau 10.

Modèle	251043
Classe d'efficacité énergétique pour le chauffage de l'eau	C
Profil de soutirage déclaré	<i>Pas d'information</i>
NF Elec. Performance	<i>Pas d'information</i>
Tension	230 V mono
Puissance	1200 W
Temps de chauffe à $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$	4h07
Production d'eau à 40°C	137L
Pertes statiques à 65°C et $T^{\circ}\text{C}$ amb. 20°C	1,05 kWh/24h
Constantes de refroidissement	0,3 Wh/l.K.24h

Tableau 10 : Caractéristiques techniques du chauffe-eau.

5.2.2 La jaquette isolante

Trouver une jaquette préfabriquée fonctionnelle à destination du chauffe-eau individuel (<300L) a été le fruit d'une longue recherche car le fabricant finalement identifié, Isosten, serait actuellement le seul en France sur le marché. La jaquette qu'il propose est constituée d'un matériau isolant « Ecopeg » issu du recyclage de bouteilles plastiques PET (conductivité $\lambda = 0.042$ W/m.K), et d'une membrane extérieure aluminisée (Figure 49).



Figure 49 : Jaquette isolante Isosten, fabriquée sur mesure

La jaquette est fabriquée sur mesure à partir des dimensions du chauffe-eau. La partie latérale se referme grâce à une bande velcro verticale. Des entailles sont nécessaires pour traverser la patte de fixation du chauffe-eau. La partie haute, indépendante, est une « galette » qui vient se poser sur la face supérieure du chauffe-eau. Les extrémités haute et basse de la jaquette latérale se rétractent grâce à un cordon de serrage, permettant une mise en œuvre soignée.

La partie supérieure est proposée en épaisseur 50 mm ou 100 mm. La partie latérale n'existe qu'en 50 mm et une version de 70 mm est en cours d'étude par le fabricant.

5.2.3 Protocole de mesure

Les points de mesure réalisés sont détaillés en Figure 50 et dans le Tableau 11.

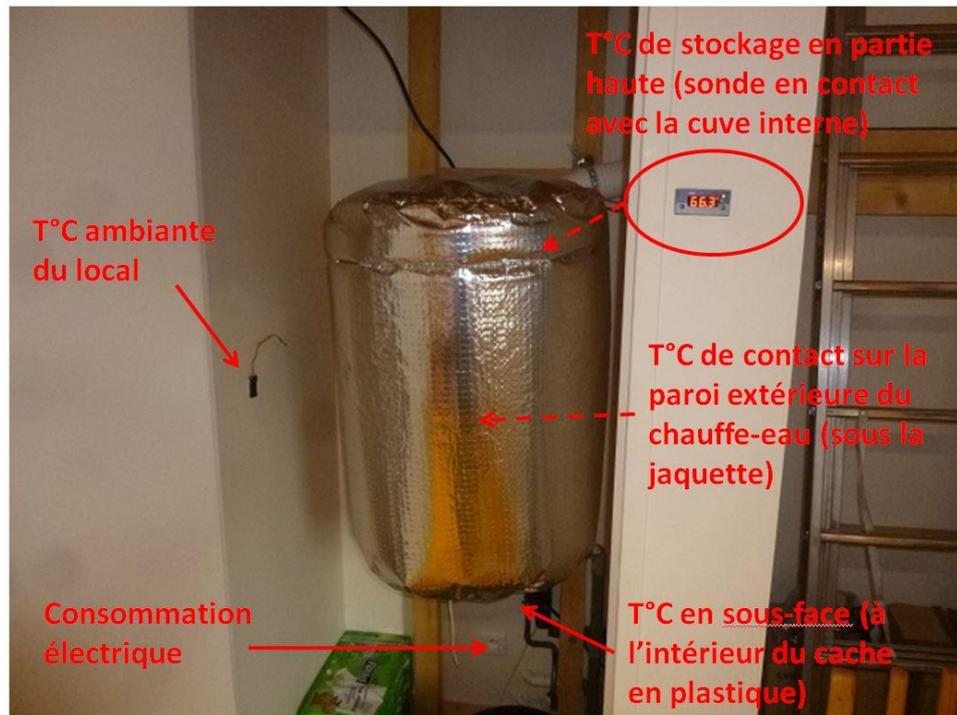


Figure 50 : Liste des points de mesures effectués sur le chauffe-eau

Points de mesure	Appareils de mesure	Pas de temps d'enregistrement
Consommation électrique du chauffe-eau	Wattmètre pince Enertech	10 min
Température de stockage	Sonde PT 1000 en contact	Relevé manuel périodique de l'afficheur
T°C contact sur la surface extérieure du chauffe-eau	Sonde Enertech	10 min
T°C partie basse dans le socle en plastique	Sonde Enertech	10 min
Sonde ambiance local	Sonde Enertech	10 min

Tableau 11 : Détail des points de mesure effectués.

Quatre configurations (A,B,C,D) ont été testées, correspondant à différents niveaux d'isolation (Tableau 12). La configuration D est théoriquement proscrite du fait du risque de détérioration du thermostat sous l'effet de la température. Elle a néanmoins été mise en œuvre sans qu'aucun problème n'apparaisse.

NB : Durant les tests, aucun puisage n'a été effectué (vanne fermée sur la sortie eau chaude).

<p>Config. A</p>	<p>Chauffe-eau initial</p> <p>du 13/09/2017 9h20 au 16/09/2017 17h00 (Durée 79h)</p>	
<p>Config. B</p>	<p>Jaquette + chapeau 50 mm (dessus)</p> <p>Du 06/09/2017 8h30 au 08/09/2017 7h30 (Durée 47h)</p>	
<p>Config. C</p>	<p>Jaquette + chapeau 100 mm (dessus)</p> <p>Du 08/09/2017 7h40 au 11/09/2017 7h50 (Durée 72h)</p>	
<p>Config. D</p>	<p>Jaquette + chapeau 100 mm (dessus) + chapeau 50 mm (dessous)</p> <p>Du 11/09/2017 8h00 au 13/09/2017 8h50 (Durée 49h)</p>	

Tableau 12 : Configurations testées dans le protocole de mesure.

Les configurations ont été mesurées sur des durées courtes (47h à 79h), puis extrapolées sur un an. Les profils d'appel de puissance de toutes les configurations sont constitués de pics d'une durée de l'ordre de 20 min, espacés de 5 à 10 heures selon les configurations (Figure 51). La méthode d'extrapolation annuelle est la suivante :

- Calcul de l'écart moyen $dT(h)$ entre deux pics d'appel de puissance, sur la durée de la configuration.
- Calcul de la consommation moyenne d'un pic de puissance $Q_{pic}(Wh)$, sur la durée de la configuration.
- Consommation annuelle extrapolée : $Q_{annuelle}(Wh) = 8760 / dT * Q_{pi}$.

NB : Les conditions de températures (ambiante local, stockage) sont considérées constantes tout au long de l'année dans ce calcul.

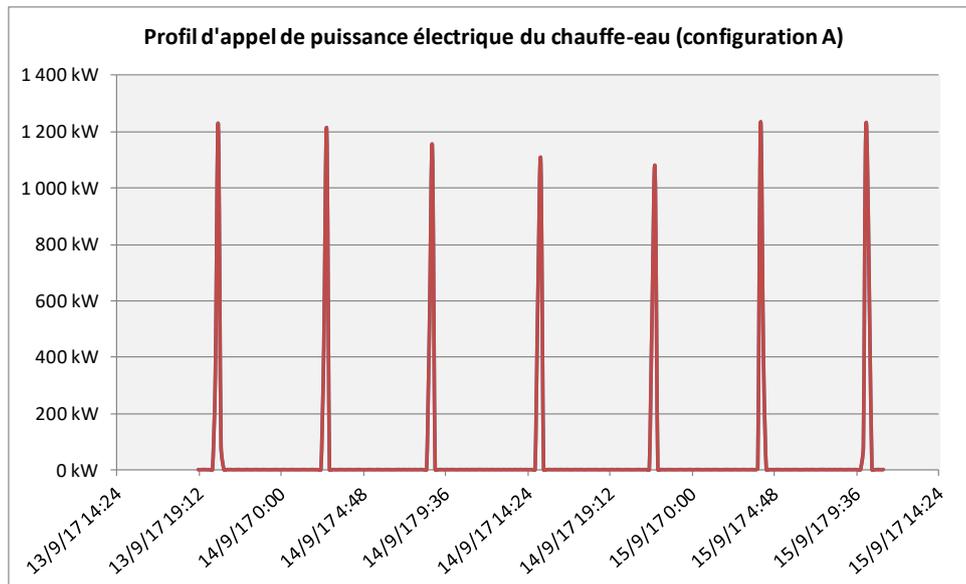


Figure 51 : Exemple de profil d'appel de puissance mesuré au pas de temps de 10 min sans puisage. L'appel de puissance présente une durée de 2 à 3 pas de temps.

5.3 Résultats

5.3.1 Résultats bruts

Les résultats de la campagne sont présentés ci-après :

- Températures (Figure 52),
- Résultats globaux (Tableau 13 et Figure 53).

Ces résultats appellent plusieurs commentaires :

- La perte statique de la **configuration A** (non isolée) est évaluée à 399 kWhél/an pour un stockage de l'eau à 65°C et une ambiance de 24,3°C, ce qui équivaut à un **Cr mesuré de 0,36 Wh/jour/L/K**. Ce Cr est 20 % supérieur à celui annoncé par le fabricant (0,30 Wh/jour/L/K).
- L'isolation des **configurations B,C et D** permet d'atteindre des gains respectifs de **21 %, 26 % et 38 %** représentant une économie annuelle d'énergie de 82, 104 et 151 kWhél/an (dT chauffe-eau / ambiance de 41K).
- L'apport thermique d'une surépaisseur d'isolant (100 mm au lieu de 50 mm) en partie haute n'est pas tout à fait négligeable, augmentant le gain énergétique de la configuration B d'un quart. Cette conclusion serait renforcée sur un chauffe-eau soumis à des puisages, la stratification étant alors plus importante.
- L'isolation de la partie inférieure est un point sensible, quand on voit que la configuration D permet d'améliorer le gain de la configuration C de 45 %, **et celui de la configuration B de 84 %**. L'isolation apportée par le cache actuel n'est certes pas nulle mais elle n'est pas suffisante. Les constructeurs disposent donc d'une marge d'optimisation, qui consisterait

à proposer un cache inférieur isolant tout en s'assurant que le thermostat et l'éventuelle électronique supportent l'augmentation de température qui en résulte, ou en déportant ces éléments (ou une partie d'entre eux) hors de la zone isolée. L'absence de puisage de nos tests augmente, bien entendu, la température en partie basse par rapport à un usage réel, mais les puisages n'ont lieu, dans tous les cas, que pendant une faible fraction du temps.

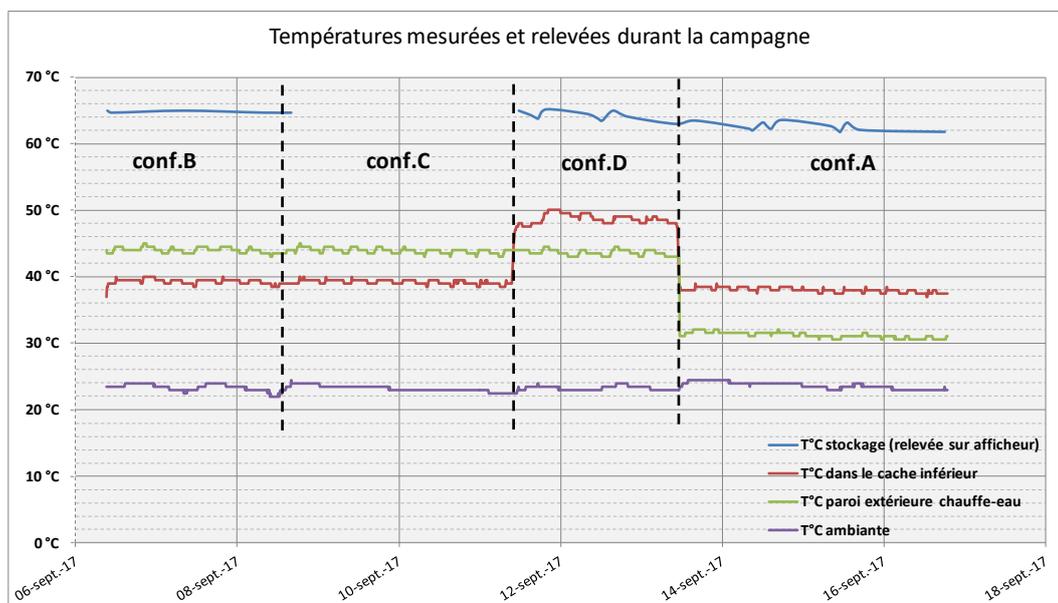


Figure 52 : Températures mesurées dans les différentes configurations.

	Températures				Pics d'appel de puissance		Pertes statiques		Diminution des pertes	
	Ambiante	Stockage chauffe-eau	Paroi chauffe-eau	Cache inf.	Durée moyenne entre 2 pics	Conso moyenne d'un pic	Extrapolation annuelle	Cr (Wh/jour/L/K)	Gain absolu	Gain relatif
Conf A sans jaquette (référence)	24.3 °C	65.0 °C	31.6 °C	38.0 °C	6.10 h	278 Whél	399 kWhél/an	0.36	-	-
Conf B jaquette 5cm partie sup.	23.5 °C	65.0 °C	44.1 °C	39.4 °C	7.30 h	264 Whél	317 kWhél/an	0.28	82 kWhél/an	21%
Conf C jaquette 10cm partie sup.	23.3 °C	65.0 °C	43.9 °C	39.2 °C	7.72 h	260 Whél	295 kWhél/an	0.26	104 kWhél/an	26%
Conf B jaquette 10cm sup. 5cm inf.	23.3 °C	65.0 °C	43.6 °C	48.6 °C	9.92 h	281 Whél	248 kWhél/an	0.22	151 kWhél/an	38%

Tableau 13 : Synthèse des résultats obtenus lors de la campagne.

5.3.2 Résultats extrapolés à des chauffe-eaux de 200 L et 300 L

Une extrapolation de ces résultats peut être faite à des chauffe-eaux de taille plus importante :

- ⇒ **Chauffe-eau 200L** : Cr fabricant type 0,2 Wh/Jour/L/K. Si on retient 20 % de dégradation pour le Cr réel (soit Cr = 0,24 Wh/Jour/L/K), une température de stockage de 65°C, une ambiance à 23°C, on trouve une perte de base de 734 kWhél/an. L'isolation B apporterait un gain de 155 kWhél/an (23 €/an TTC), l'isolation C de 191 kWhél/an (29 €/an TTC) et l'isolation D de 279 kWhél/an (42 €/an TTC).
- ⇒ **Chauffe-eau 300L** : le même calcul avec un Cr fabricant de 0,18 Wh/Jour/L/K donne une perte statique annuelle réelle de 994 kWhél/an dans les mêmes conditions. Dans ce cas

l'isolation B apporterait un gain de 209 kWh/an (31 €/an TTC), l'isolation C de 258 kWh/an (39 €/an TTC) et l'isolation D de 378 kWh/an (57 €/an TTC).

Au prix actuel de 230 €^{TTC}, la jaquette ISOSTEN est donc amortie en 5 à 10 ans selon les configurations, pour un chauffe-eau stockant l'eau à 65°C.

A 50°C les pertes sont réduites d'un tiers, et le temps de retour augmente en conséquence. Il faut néanmoins souligner que le réglage fin de la température est impossible sur l'immense majorité des chauffe-eaux et que le réglage d'usine des thermostats porte la température de stockage autour à 60-70°C.

Il faut souligner enfin que certains chauffe-eaux sont installés dans des ambiances plus froides (caves, garages non chauffés) que l'ambiance de 23°C de nos tests, ce qui joue en faveur de la jaquette.

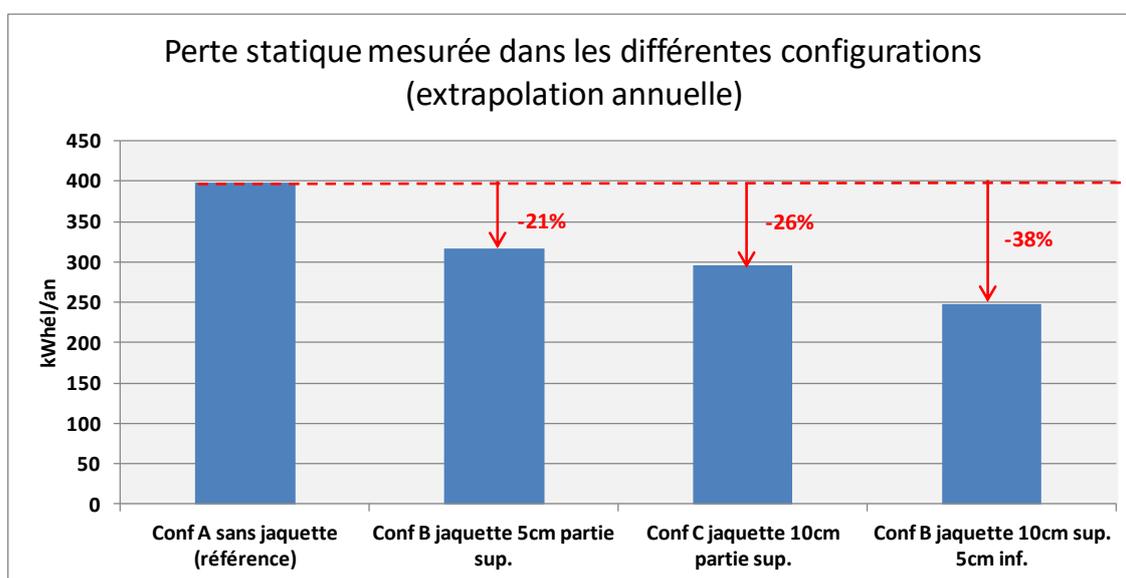


Figure 53 : Pertes statiques mesurées et extrapolées sur le chauffe-eau de 75 L.

5.4 Conclusion

Les mesures effectuées montrent que la jaquette isolante est un produit **efficace et rentable pour diminuer les pertes statiques** des chauffe-eaux. La fabrication en plus grande série devrait permettre d'améliorer le temps de retour, compris actuellement entre 5 et 10 ans selon les configurations pour un stockage à 65°C et une ambiance à 23°C. L'absence de possibilité de réglage de la température de stockage, avec des réglages d'usine élevés, favorisent l'intérêt du système.

Une piste d'amélioration serait de travailler, avec les fabricants, à une solution permettant d'isoler également la partie *inférieure* des chauffe-eaux, actuellement très déperditif malgré le cache en plastique installé à cet endroit, ce dernier n'étant pas isolé.

6 ANNEXE 2 : Mesure des performances d'un système de production ECS instantanée avec récupération de chaleur

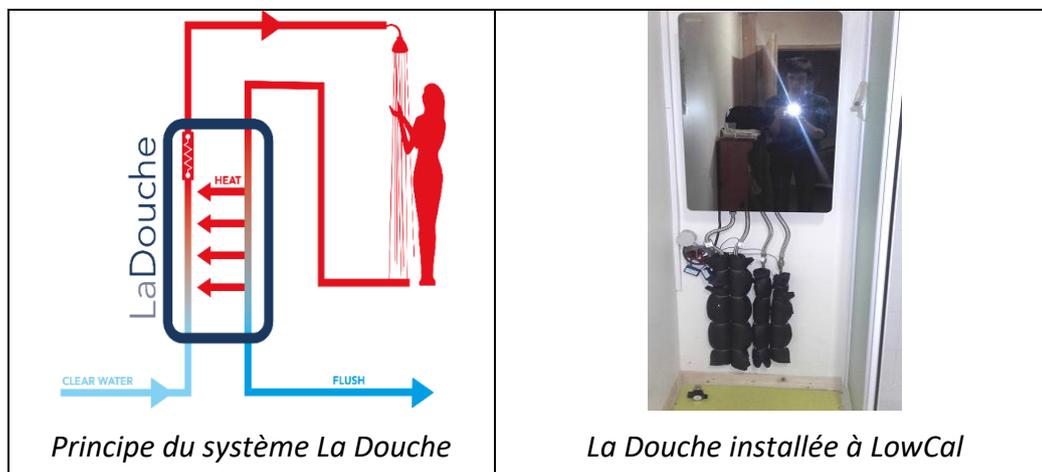
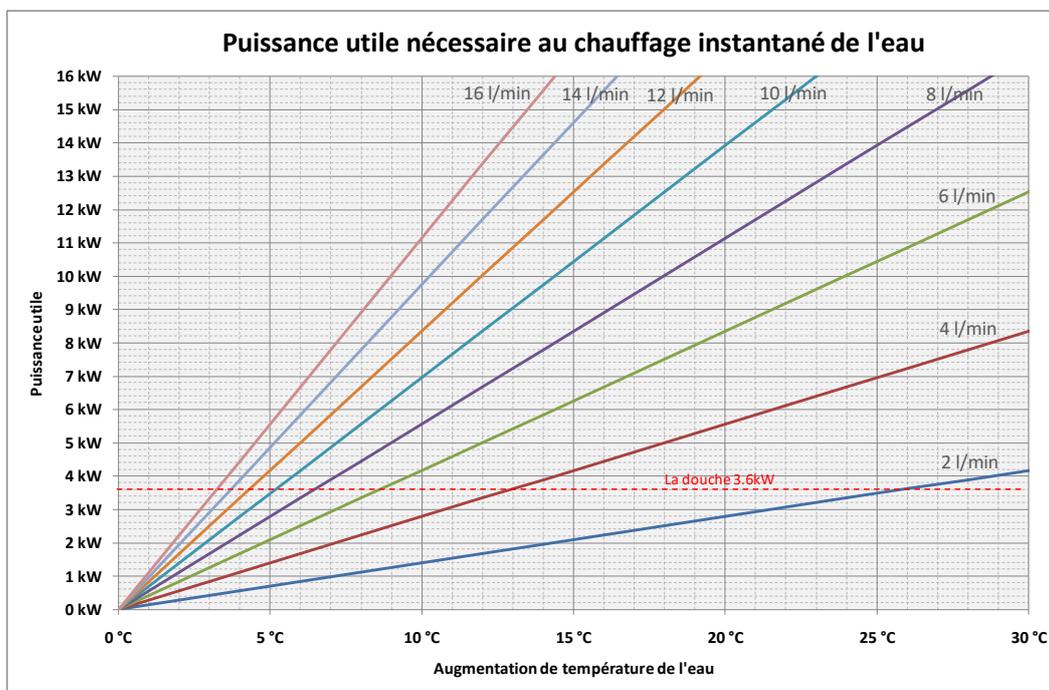
6.1 Objectif du test

L'objectif de cette expérience est de déterminer *par la mesure* l'efficacité du système de production d'ECS instantané LaDouche.

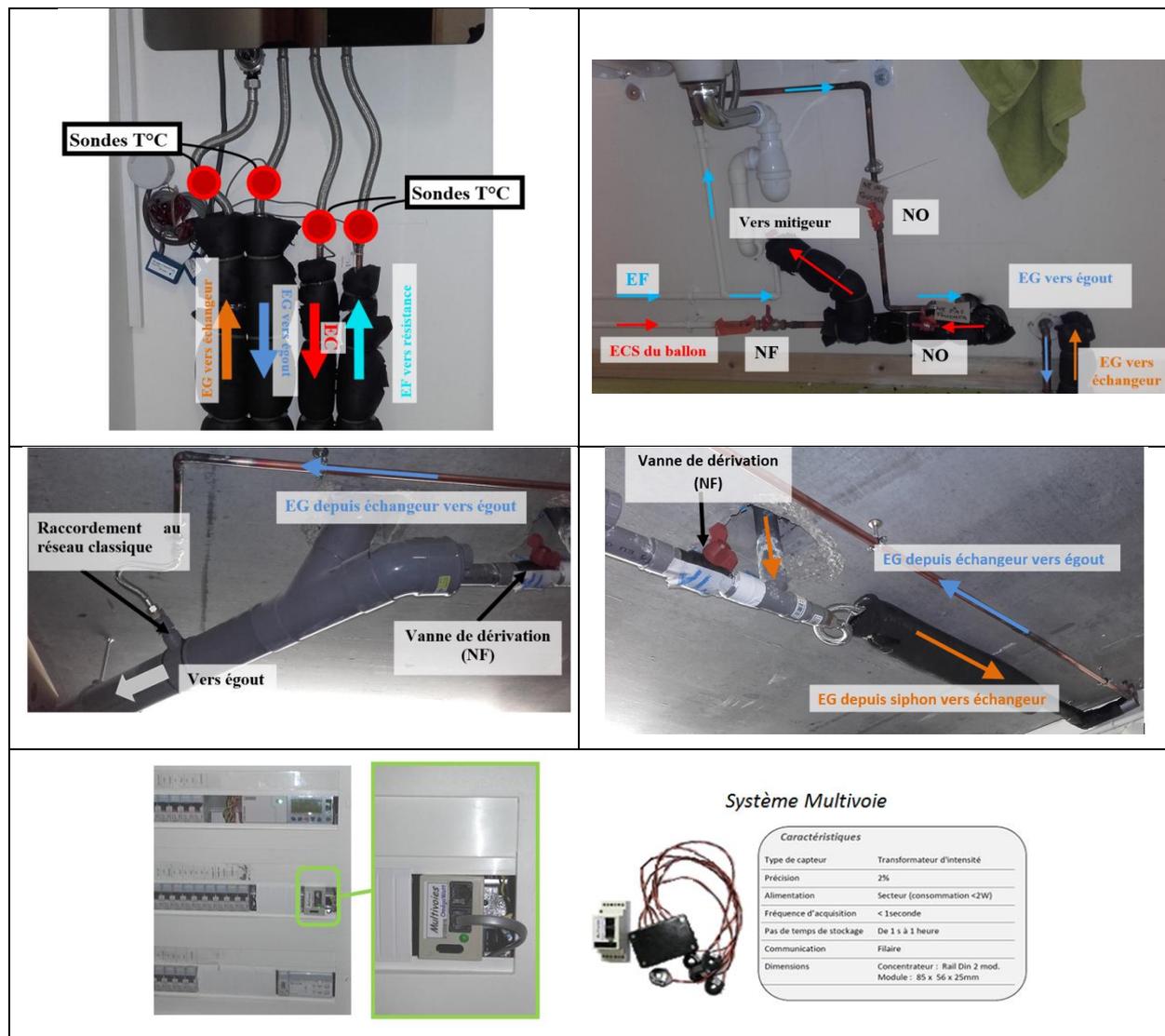
Différents points de mesure ont été mis en place pour suivre la consommation électrique et les différentes températures aux bornes de l'échangeur au pas de temps de 2 secondes sur des durées de puisage allant de 5 à 10 minutes.

6.2 Installation et métrologie

Le système LaDouche mis en place au LowCal est un prototype développé par SOLABE et bientôt commercialisé par QUANTIA. Il s'agit d'un système de chauffe-eau instantané équipé d'une résistance de seulement 3600 W. Cette faible puissance de résistance est rendue possible par une récupération de chaleur active (pompe + échangeur à plaques) sur les eaux grises, permettant de préchauffer l'eau froide. Sans ce dispositif de récupération efficace, la puissance de 3600 W ne permettrait d'élever la température de l'eau que de 5°K au débit de 10 L/minute.



Afin d'évaluer plus précisément le taux de récupération global et l'efficacité de l'échangeur sur des douches de 5 minutes, le pas de temps de la métrologie a été fixé à 2 secondes. Les points de mesure réalisés sont détaillés dans le tableau ci-dessous



Points de mesure	Appareils de mesure	Pas de temps d'enregistrement
Consommation électrique résistance	Système Multivoies	2 secondes
T°C arrivée Eau Froide	Sonde Enertech	2 secondes
T°C sortie Eau Chaude	Sonde Enertech	2 secondes
T°C eau grise vers échangeur	Sonde Enertech	2 secondes
T°C échangeur vers égout	Sonde Enertech	2 secondes
Débit de puisage	Bécher gradué	Mesure instantanée

Tableau 14 : Liste des points de mesure effectués.

6.3 Résultats

La Figure 54 illustre l'évolution des 4 températures mesurées aux bornes de LaDouche (eau froide, eau chaude, eau grise vers échangeur et échangeur vers égout) ainsi que la puissance appelée par la résistance électrique, sur une séquence de puisage de 5 minutes.

NB : le système est ici démarré « à froid » (sans préchauffe du corps de l'échangeur) ce qui explique le temps de mise en chauffe observé au puisage. Lorsque le système est éteint pour éviter la (très faible) consommation d'entretien, une séquence de préchauffe d'une vingtaine de minutes permet d'éviter ce phénomène.

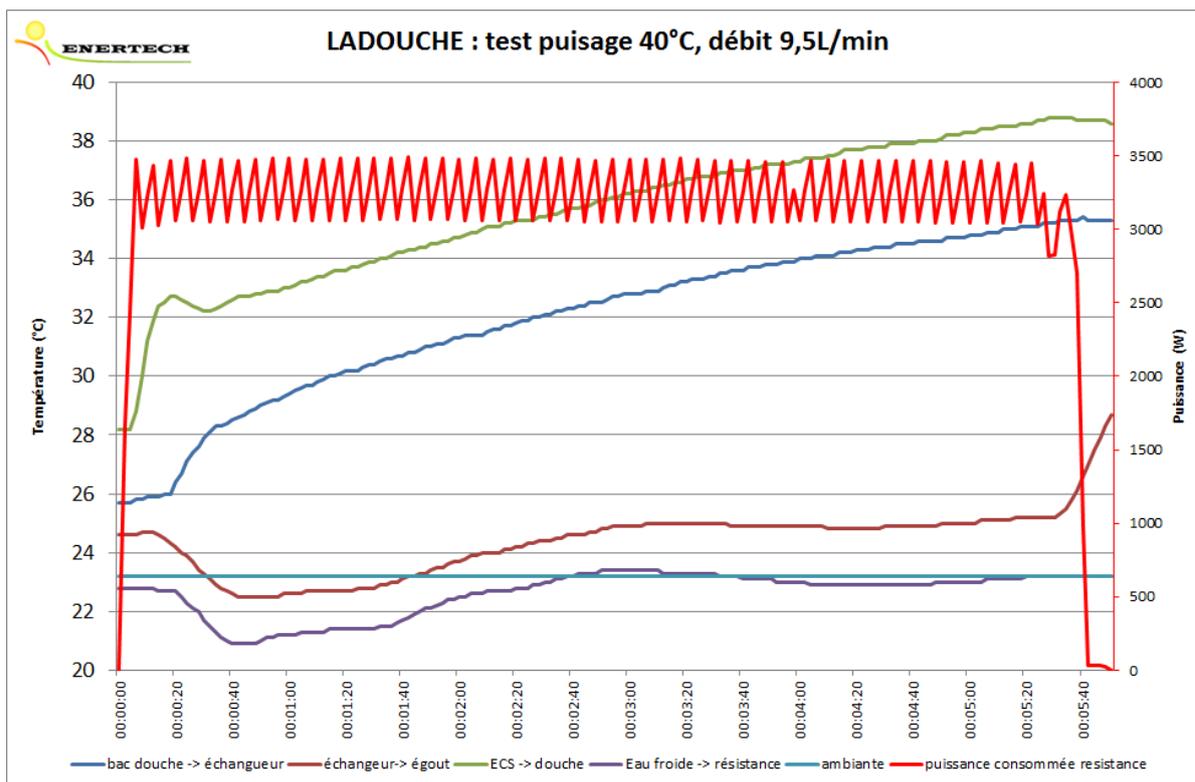


Figure 54 : Mesure des températures aux bornes du système sur une séquence de 5 minutes (pas de temps 2s).

La Figure 55 illustre l'évolution de l'efficacité de l'échangeur et le taux de récupération global du système (c'est-à-dire incluant les pertes thermiques entre la sortie pommeau et l'évacuation) sur une douche de consigne de 40°C et un débit de puisage de 9,5 L/min.

Les calculs sont effectués de la manière suivante :

- « Eff échangeur » (%) = $\frac{T^{\circ}\text{C eau grise vers échangeur} - T^{\circ}\text{C échangeur vers égout}}{T^{\circ}\text{C eau grise vers échangeur} - T^{\circ}\text{C eau froide}}$ avec comme postulat l'équilibre des débits aux bornes de l'échangeur.

Le taux de récupération global du système complet a été calculé de deux manières différentes :

- « Taux de récup global » (%) = $\frac{T^{\circ}\text{C eau grise vers échangeur} - T^{\circ}\text{C échangeur vers égout}}{T^{\circ}\text{C eau chaude pommeau} - T^{\circ}\text{C eau froide}}$ avec comme postulat l'équilibre des débits aux bornes de l'échangeur.
- « Calcul sur énergie » (%) = $\frac{\text{Energie Utile totale calculée} - \text{Energie électrique mesurée}}{\text{Energie Utile totale calculée}}$

avec : $\text{Energie totale calculée} = \text{débit instantané pommeau} \times (T^{\circ}\text{C eau chaude pommeau} - T^{\circ}\text{C eau froide})$

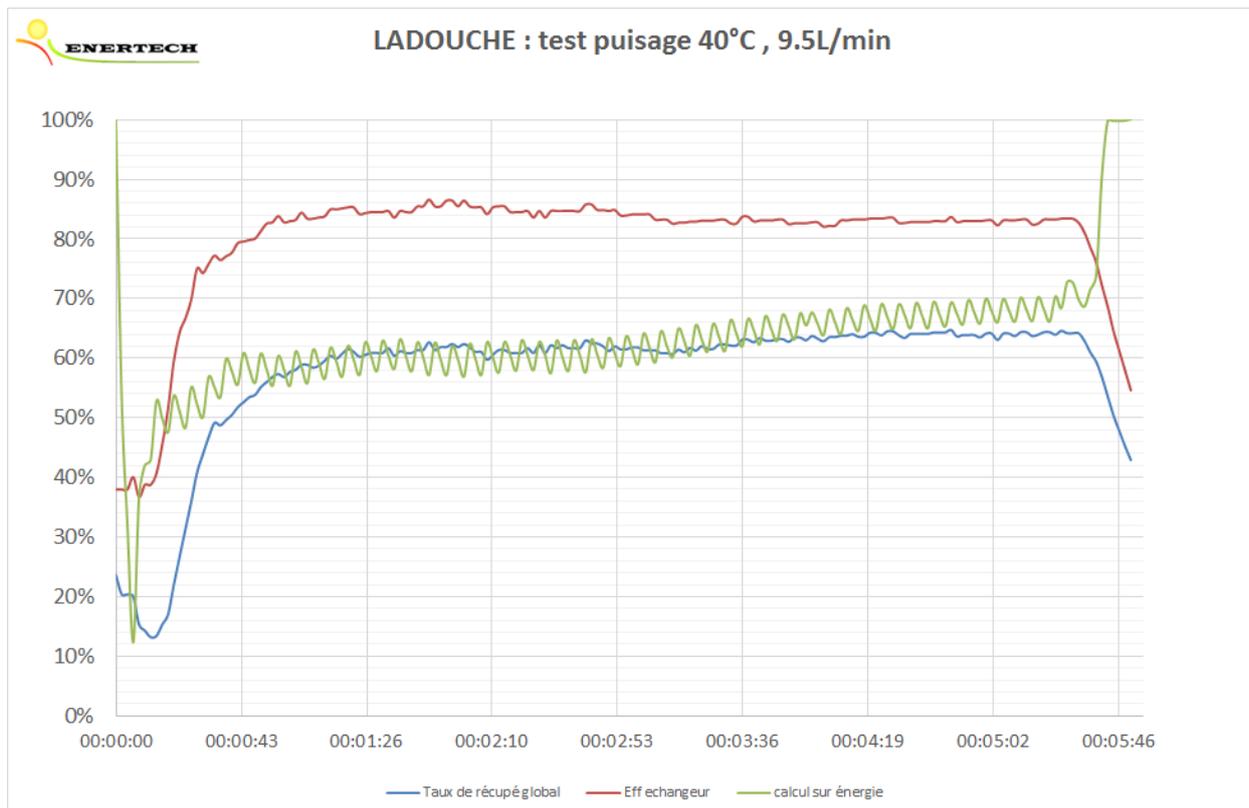


Figure 55 : Evolution de l'efficacité de l'échangeur et taux de récupération global d'énergie incluant les pertes de chaleur entre la sortie pommeau et l'évacuation.

6.1 Conclusion

Sur une douche type (40°C ; 9,5 L/min), le taux de récupération moyen du système est de l'ordre de 60 à 70 % en régime établi, malgré une efficacité mesurée de 85 % sur l'échangeur à plaques. Cette différence s'explique par la perte de chaleur (non récupérée) entre la sortie du pommeau et la récupération par l'échangeur après passage dans le bac à douche et la canalisation d'eaux usées.

Le système s'avère très pertinent dans la mesure où il remplit l'objectif de fournir une douche chaude en production instantanée avec seulement 3,6 kW de puissance électrique, ce qui autorise l'installation du système dans un logement avec un abonnement classique de 6 kVA.

Un problème a toutefois été relevé après une utilisation régulière à LowCal : l'encrassement trop fréquent du filtre protégeant la pompe de relevage et l'échangeur. Ce problème est en cours de résolution par SOLABLE et QUANTIA.