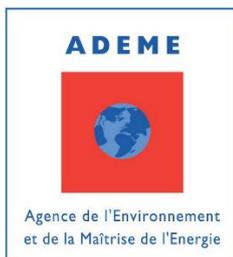


Projet : LowCal, étude du premier bâtiment E4C2 pour massifier la réalisation, à coût maîtrisé, du bâtiment à énergie positive, bas carbone, low-tech, local et sans chauffage

Tâche 2 : High confort
Sous-tâche 2.3 : Confort Visuel

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



Coordination technique ADEME:
Romuald CAUMONT
romuald.caumont@ademe.fr
01 47 65 21 49

Version	Rédigé par	Relu par	Date
1	JL	OG	09/07/2020

SOMMAIRE

1 Objectifs	3
2 Satisfaction des usagers sur l’ambiance lumineuse générale	3
3 Étude du confort visuel en éclairage naturel	5
3.1 <i>Satisfaction des travailleurs concernant la luminosité naturelle</i>	5
3.2 <i>Etude du facteur de lumière du jour (FLJ)</i>	5
3.3 <i>Équilibre des luminances au poste de travail</i>	16
4 Eclairage artificiel	21
4.1 <i>Mesure des consommations d’éclairage</i>	21
4.2 <i>Les luminaires utilisés dans les bureaux</i>	22
4.3 <i>Les niveaux d’éclairages artificiels</i>	26
4.4 <i>Allumage extinction des luminaires</i>	28
4.5 <i>Autonomie en éclairage naturel</i>	30
5 Conclusion	32

1 Objectifs

Les objectifs de ce rapport sur le confort visuel du bâtiment Lowcal sont :

1. d'évaluer le confort visuel des usagers en éclairage naturel et artificiel
2. de déterminer les principaux paramètres influant sur le confort visuel ressenti (orientation des baies, niveaux d'éclairement moyen, uniformité d'éclairement sur les postes, équilibre des luminances dans le champ visuel)
3. d'évaluer les paramètres influant sur l'autonomie en éclairage naturel
4. d'optimiser la position et l'orientation des postes de travail, et l'utilisation des occultations.

Le confort visuel, nécessaire pour travailler dans de bonnes conditions, consiste à avoir un éclairage suffisant sans éblouissement. La base de la gestion de ce confort est assurée grâce à l'éclairage naturel via les fenêtres. Des luminaires fournissent l'appoint (plafonniers). En cas d'éblouissement, des protections solaires seront utilisées (extérieures en été et intérieures en hiver).

Ce rapport présente et analyse les résultats des mesures physiques effectuées dans les bureaux entre février 2017 et juin 2018, ainsi que les résultats d'un questionnaire réalisé en juin 2018 pour connaître le ressenti des usagers sur l'ambiance lumineuse de Lowcal.

2 Satisfaction des usagers sur l'ambiance lumineuse générale

Un questionnaire sur l'ambiance intérieure des bureaux a été réalisé et soumis aux usagers des bureaux de Lowcal. Ce questionnaire a été réalisé par **Flore Bienfait** dans le cadre de sa thèse sur le confort au travail (Mastère spécialisé Construction et Habitat Durables aux Arts et Métiers d'Aix en Provence).

Nous présentons dans la suite du rapport les réponses concernant l'ambiance lumineuse. 24 personnes présentes sur 27 postes occupés ont répondu à ce questionnaire.

« Appréciez vous votre cadre de travail ? »

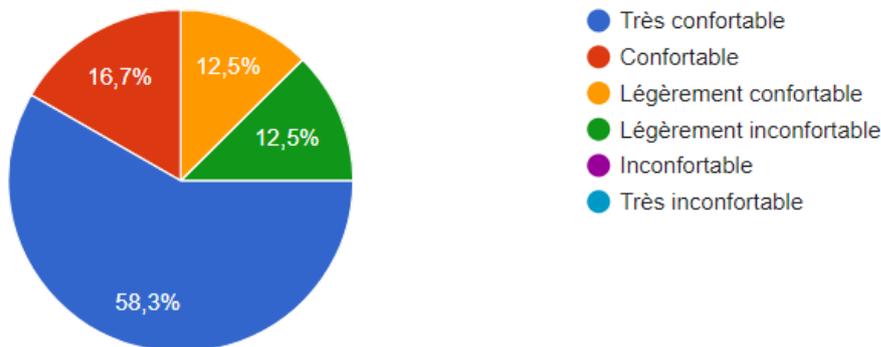
-100 % des personnes répondent OUI.

« Pour quelle raison principale ? » :

- L'éclairage naturel est systématiquement mentionné (100 % des réponses), devant la taille des espaces (mentionné dans 88 % des réponses) et le confort thermique du bâtiment (83%).

Comment trouvez-vous l’ambiance lumineuse de votre bureau ?

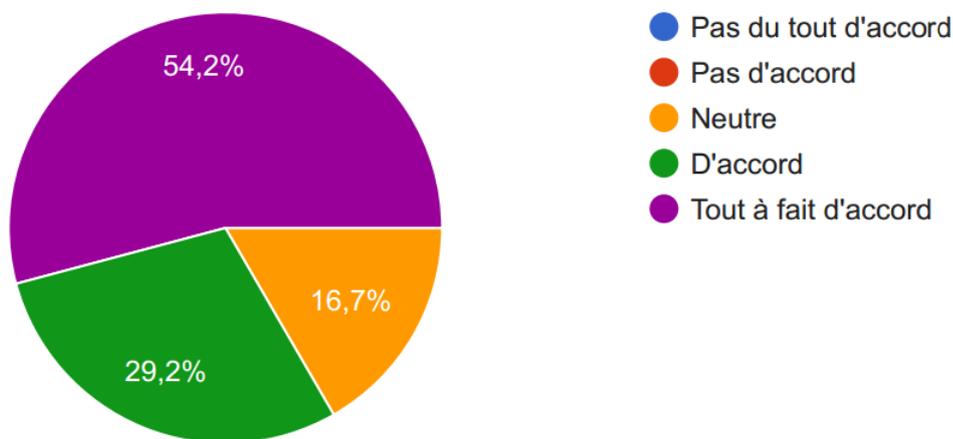
24 réponses



Seules 3 personnes sur 24 jugent négativement (« légèrement inconfortable ») l’ambiance lumineuse à leur poste de travail.

J’apprécie les belles vues dégagées sur l’extérieur depuis mon bureau

24 réponses



Tous les bureaux possèdent une fenêtre donnant sur l’extérieur à hauteur des yeux (hauteur d’allège : 100cm).

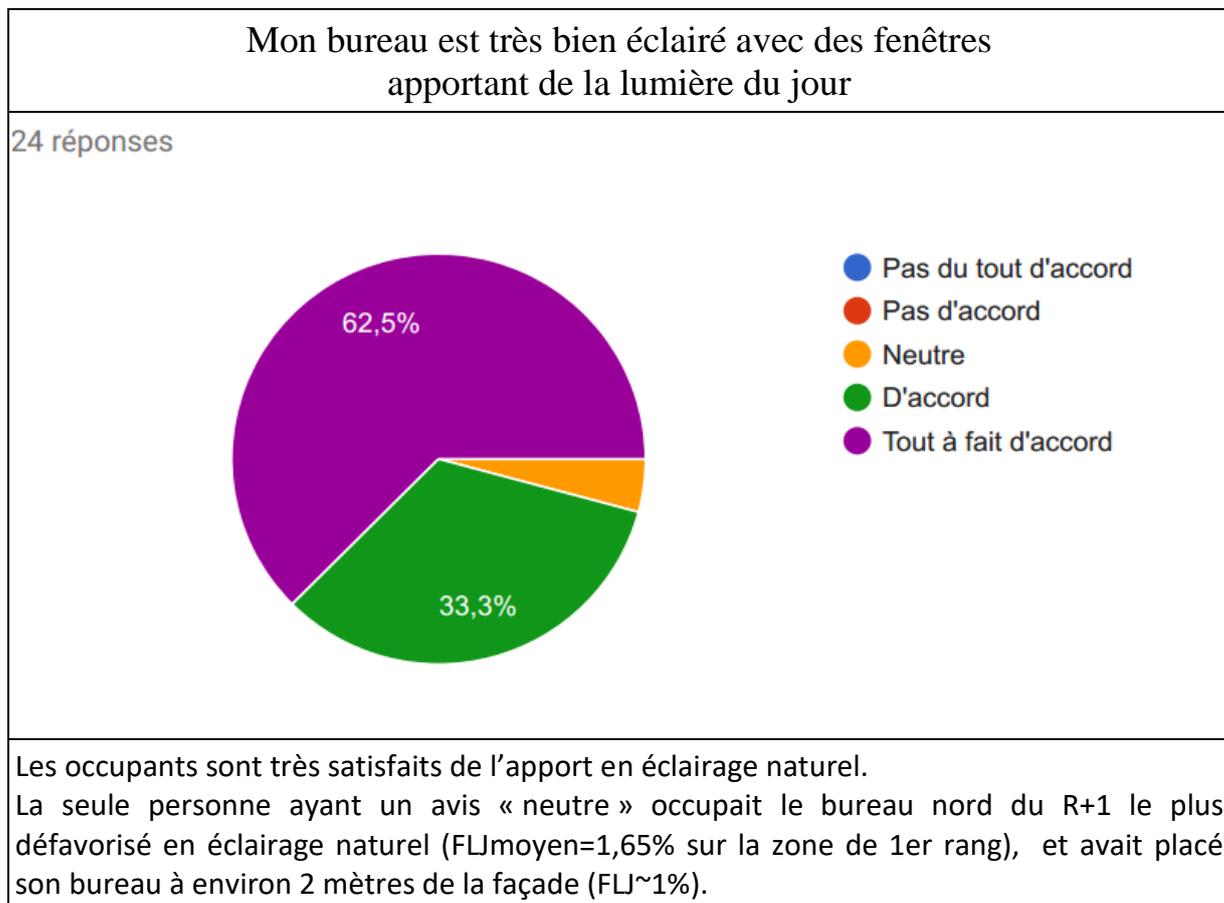
Les bureaux à l’étage ont une vue dégagée sur l’extérieur (arbres, collines, toits).

Au RDC, la vue est plus banale (neutre) et 3 bureaux ont un masque proche (maisons). Les personnes qui occupent ces bureaux positionnent souvent leur bureau dos à la à la fenêtre.

Dans la majorité des cas, les bureaux sont orientés à 90° par rapport à la fenêtre apportant le plus de lumière.

3 Étude du confort visuel en éclairage naturel

3.1 Satisfaction des travailleurs concernant la luminosité naturelle



Aucun usager ne se plaint d'être trop éclairé : des occultations intérieures et extérieures sont mises en place contre le suréclairage et l'éblouissement.

3.2 Etude du facteur de lumière du jour (FLJ)

Le logiciel Dialux EVO a été retenu pour estimer les FLJ. Il permet de prendre en compte précisément tous les types de masques extérieurs proches et lointains. Les simulations peuvent être réalisées sur des pièces de toutes les formes (pas uniquement rectangulaires), avec des zones de calcul FLJ de formes variées.

En plus de l'ancienne version (nommée simplement Dialux), ce logiciel Dialux EVO :

- permet de prendre en compte la réelle épaisseur des murs
- permet de modéliser et de calculer les FLJ sur la TOTALITÉ des pièces de l'opération, en prenant en compte l'ensemble des masques en un temps très court. Ceci permet de tester de nombreuses configurations et d'optimiser plus facilement le bâtiment pour favoriser l'éclairage naturel.

Le modèle de ciel utilisé est le modèle **Ciel couvert uniforme** CIE. Ce modèle est basé sur le modèle de Moon and Spencer et largement utilisé pour le calcul du facteur de lumière de jour.

Hypothèses de simulations :

- hauteur sous plafond de 240cm
- Hauteur de bureau 75cm
- coefficient de réflexion : murs:70 % - plafond : 50 % - sol : 30 %
- profondeur de la zone de premier rang : 330cm depuis le nu intérieur de la façade.

Un point de calcul des FLJ est réalisé tous les 50 cm au maximum.

Position des vitrages	En tunnel
Épaisseur des murs	50cm
Ratio de clair (clair de vitrage/ouverture)	73%
Facteur de réflexion du cadre	30%
Transmission lumineuse	70%
Facteur solaire	0.58
Coefficient UG	0.60 W/(m ² .K)

Caractéristiques typiques des baies vitrées de Lowcal

FLJ	- de 1%	1 à 2 %	2 à 4 %	4 à 7 %	7 à 12 %	+ de 12 %
	Très faible	Faible	Modéré	Moyen	Elevé	Très Elevé
Zone considérée	Zone éloignée des fenêtres (distance env. 3 à 4 fois la hauteur de la fenêtre)			A proximité des fenêtres ou sous des lanterneaux		
Impression de clarté	Sombre à peu éclairé		Peu éclairé à clair		Clair à très clair	
Impression visuelle du local	Cette zone semble être séparée de cette zone					
Ambiance	Le local semble être refermé sur lui-même			Le local s'ouvre vers l'extérieur		

*Interprétation des résultats : analyse des FLJ
d'après le programme RAVEL Suisse de 1993 « Eclairage : éléments d'éclairagisme).*

Deux relevés ont été réalisés avec des éclairagements horizontaux extérieurs de 6000 lux et 33000 lux.

Les FLJ relevés sur les postes de travail sont très proches de ceux estimés par simulation. En particulier en moyenne on a :

<i>FLJ moyens relevé sur les postes Ehor = 33000 lux</i>	<i>FLJ moyens relevé sur les postes Ehor = 33000 lux</i>	<i>FLJ moyens sur postes d'après simulation Dialux EVO</i>
3,2 %	3 %	2,9 %

En moyenne les mesures sont légèrement plus favorables que les estimations de FLJ réalisées avec Dialux EVO. Ceci peut être du aux fluctuations de l'éclairage extérieur durant la mesure.

Niveau de FLJ	Nb. de postes de travail concernés
0,90 %	3
Entre 1 % et 2 %	4
Entre 2% et 4 %	13
Entre 4 % et 6 %	5
6,50 %	2
TOTAL	27

*Synthèse des mesures de FLJ
effectuées par temps couvert à LowCal*

Seuls les niveaux de FLJ inférieurs à 2 % sont problématiques pour les usagers. Cela concerne en particulier 7 postes dans le bâtiment.

Nous proposons ci-après des solutions pour améliorer la situation de ces 7 postes.

Certains bureaux sont décalés de 1m par rapport à la façade pour permettre d'ouvrir complètement les fenêtres afin d'aérer les locaux en arrivant le matin. En effet une caisson de séparation a été installé pour séparer 2 bureaux face-à-face. La hauteur de ce caisson est supérieure à l'allège de la fenêtre et empêche l'ouverture.

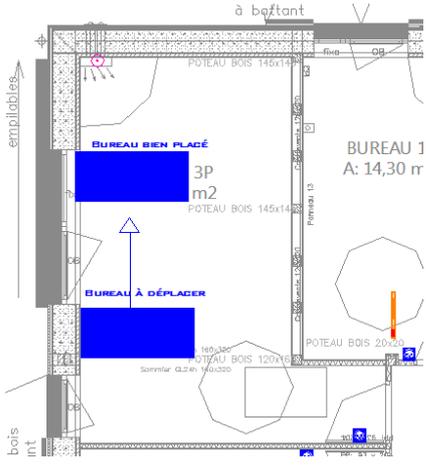
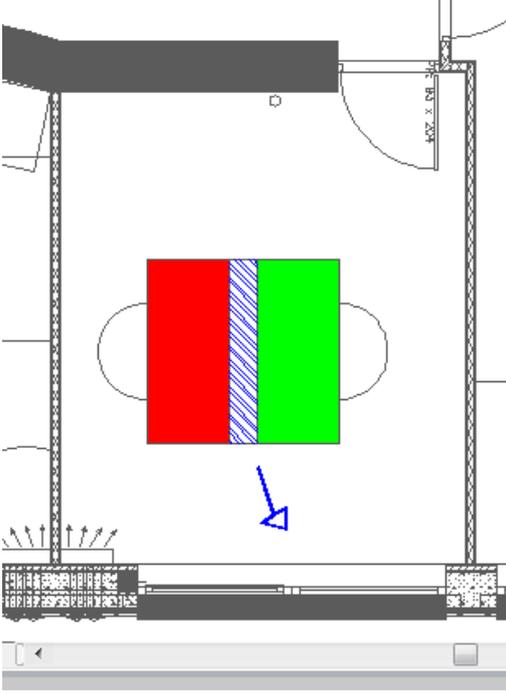
La largeur des menuiseries est très importante : la plupart des ouvrants des façades sud-est-ouest mesurent entre 110cm et 145cm de largeur! Ceci oblige pour la ventilation matinale estivale (rafraîchissement efficace par ouverture battantes des baies) à décaler les bureaux de 90cm à 125cm par rapport au nu intérieur de la façade. La zone la mieux éclairée naturellement n'est pas utilisable. Une espace de 50cm est normalement suffisant pour passer devant les fenêtres pour les manipuler.

Cette largeur de battant a été retenue pour des raisons économiques, et afin de pouvoir nettoyer les fenêtres par l'intérieur, et faire coulisser les volets en façades Est ou Ouest.

Cependant, cette largeur importante ne permet pas d'envisager de laisser les fenêtres ouvertes en position battante l'été (uniquement en oscillo).

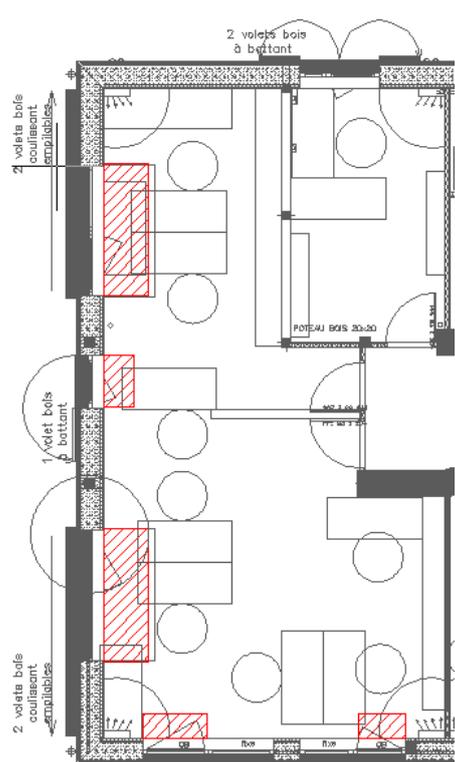
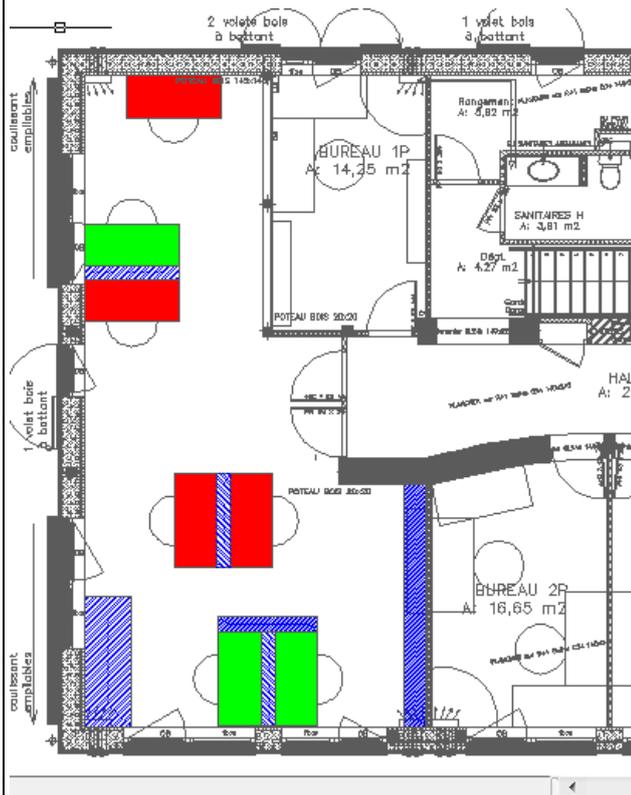
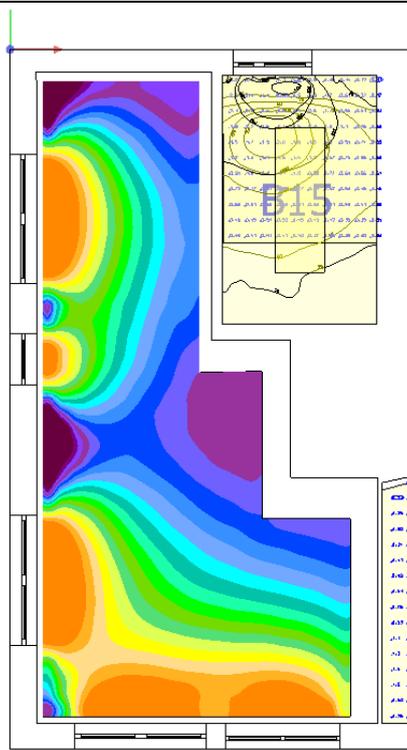
Il serait prévoir de limiter la largeur des ouvrants à 60cm ce qui permettrait d'envisager de les laisser ouverts la nuit (avec fixation intérieur) et n'empiéterait pas sur la zone disponible de 1^{er} rang. Sur une baie de 250cm de largeur, il serait préférable de prévoir :

- soit 2 ouvrants de 60cm aux extrémités et un fixe de 130cm au centre.
- soit (pour une baie au sud, avec le même clair de vitrage et moins chère), un seul battant de 60cm à l'extrémité, et un fixe de 190cm : en effet le nettoyage des fenêtres se fait en fait par l'extérieur.

Emplacement du bureau	Solutions envisagées
<p>L'accueil au RDC a été volontairement placé après le SAS de façade. Le poste de travail est à plus de 250 cm de la façade.</p>	<p>Pas de solution envisagée du fait de la fonction et de la position de ce bureau particulier.</p>
<p>Un poste de travail au RDC ouest. Le bureau de l'entrée peut être déplacé en face du bureau principal.</p>	
<p>Un poste de travail à l'étage au sud a été placé à plus de 1,2 mètres de la façade pour éviter l'éblouissement (avant la pose de store et parce que l'écran secondaire est dos à la fenêtre). Il est conseillé de rapprocher le bureau de la fenêtre et de changer l'écran secondaire</p>	

4 postes de travail dans l’open-space sud-ouest à l’étage ont un FLJ<2 %.
 Il a été décidé durant la construction de réunir 2 bureaux (4+3 personnes) pour créer un open-space. Il a été occupé progressivement et la position des bureaux n’a pas été repensée depuis.

En redisant les bureaux le long des fenêtres comme proposé sur le plan, les bureaux profitent au mieux de l’éclairage naturel et bénéficient tous d’un FLJ> 2 %.



**Implantation des bureaux dans l’open-space ouest à l’étage
 implantation actuelle à gauche / implantation proposée à droite
 (les zones rouges représentent les zones nécessaires à l’ouverture des fenêtres)**

Protections solaires

Le confort visuel, nécessaire pour travailler dans de bonnes conditions, consiste à avoir un éclairage suffisant mais sans éblouissement. La base de la gestion de ce confort est assuré grâce à l'éclairage naturel via les fenêtres. Si ce n'est pas suffisant, des luminaires fournissent l'appoint (plafonniers). En cas d'éblouissement, les occultations extérieures sont utilisées en été et les stores intérieurs en hiver.

3.2.1 Les différentes protections solaires utilisées sur Lowcal

<p>PROTECTIONS ESTIVALES SUD Brise-soleil Orientables BSO extérieurs à commandes motorisées</p>	<p>PROTECTIONS HIVERNALES SUD Stores screens filtrants intérieurs à commande manuelle</p>
	
<p>PROTECTIONS ESTIVALES EST / OUEST Volets bois extérieurs battants ou coulissants</p>	<p>PROTECTIONS HIVERNALES EST / OUEST Stores californiens intérieurs à commande manuelle</p>
	

3.2.2 La commande des protections solaires



Dans l'ordre, de gauche à droite :

- marche arrêt de la ventilation du bureau
- commande du BSO (dans les bureaux SUD uniquement)
- interrupteur de l'éclairage plafonnier par interrupteur simple allumage.

Consignes concernant l'utilisation des occultations en fonction de l'orientation et de la saison extrait du « Livret d'accueil » d'Enertech :

Consignes spécifique pour l'hiver

À cette saison, il s'agit de maximiser les apports solaires en minimisant les déperditions de chaleur. L'ensemble des volets et brise-soleils doivent être ouverts en occupation lorsque le rayonnement solaire atteint la façade associée. La protection contre l'éblouissement doit donc se faire uniquement avec les stores intérieurs.

En inoccupation le week-end, le maximum de volets restent ouverts.

Consignes spécifiques pour l'été

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

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

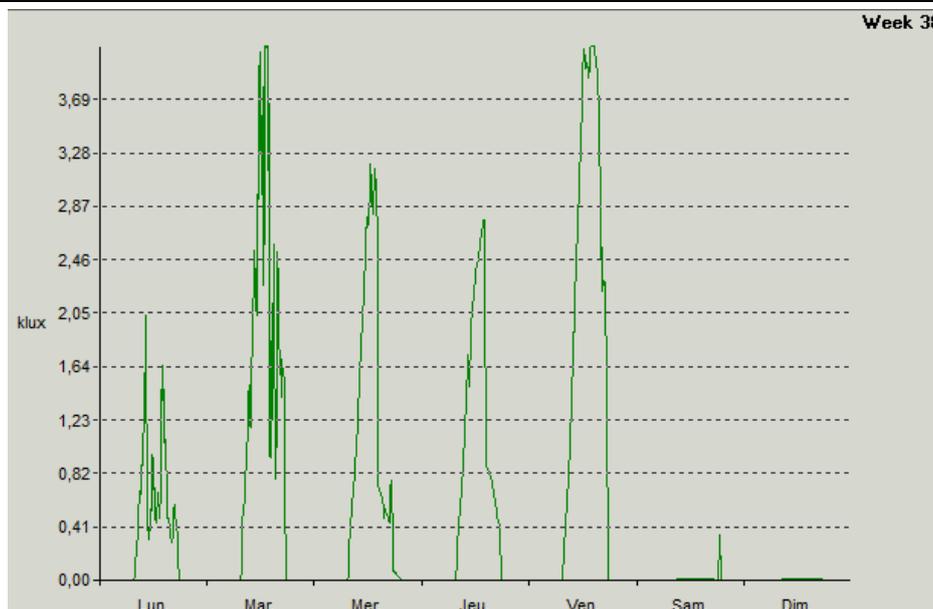
- Dès que le soleil atteint la façade sud, les brise-soleils devront être ajustés pour empêcher l'entrée du rayonnement.

- En inoccupation nuit en semaine : - tous les volets doivent être complètement fermés. - Les brise-soleils doivent être en position complètement descendu et lames à 45° pour les bureaux sud afin de laisser passer l'air nécessaire au rafraîchissement nocturne. La fermeture de chaque occultation externe doit être faite au fur et à mesure des départs.

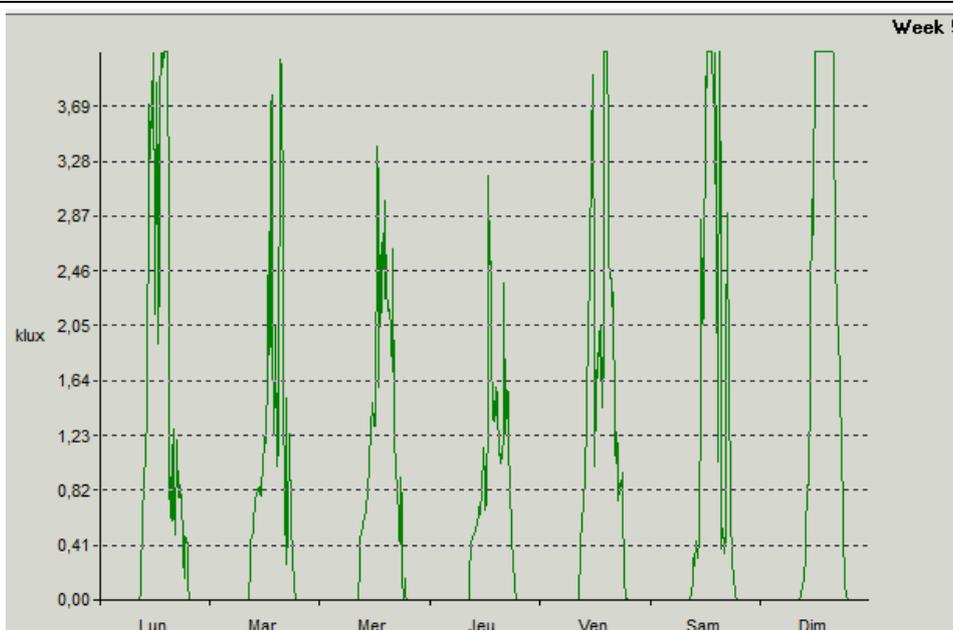
- En inoccupation week-end, tous les volets et brise-soleils doivent être complètement fermés (pas de ventilation nocturne possible).

Les figures suivantes représentent les mesures d'éclairage sur un bureau situé à l'étage, orienté sud, équipé à la fois de stores intérieurs et de BSO extérieurs.

Eclairage sur un poste de travail d'un bureau orienté sud en ÉTÉ
Les BSO sont volontairement FERMES en fin de journée et les WE
pour éviter les apports solaires thermiques .

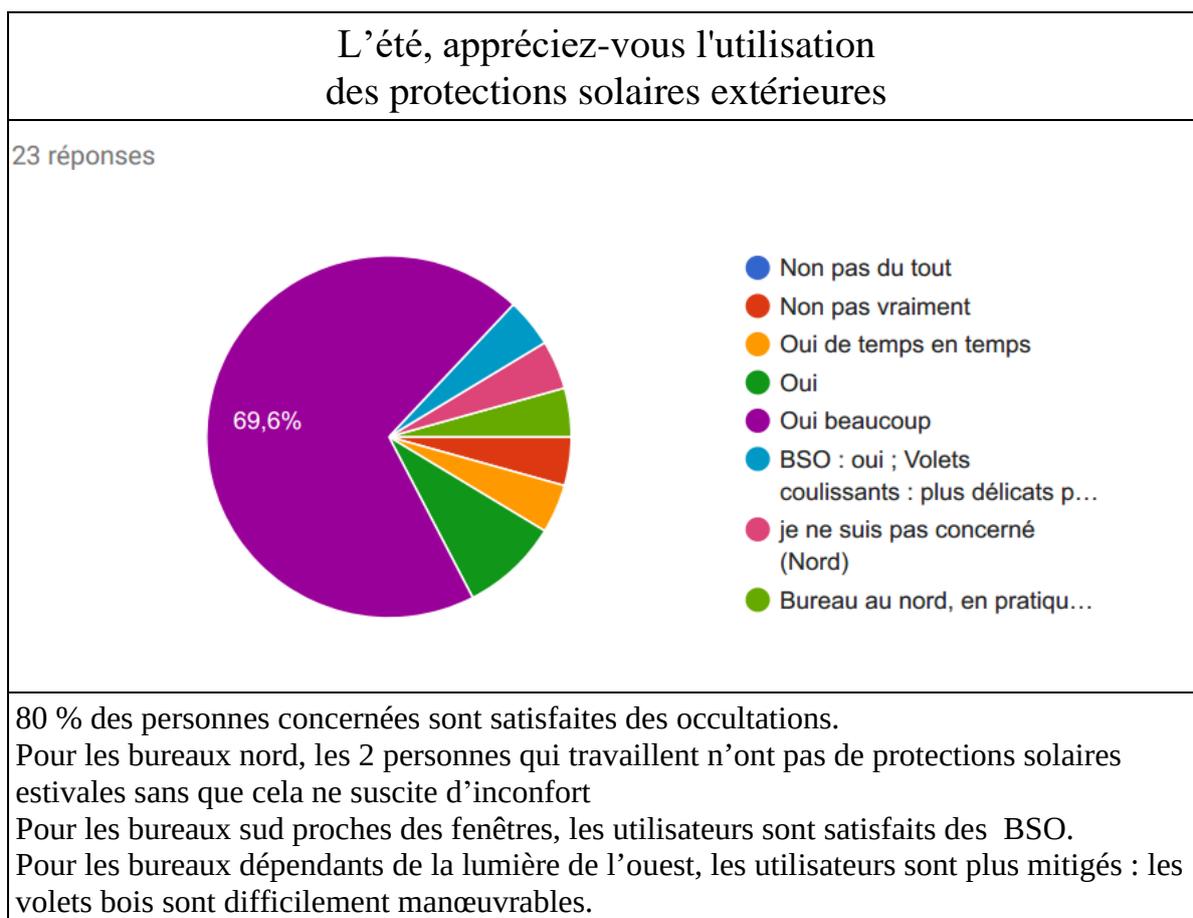


Eclairage sur un poste de travail d'un bureau orienté sud en ÉTÉ
Les BSO sont volontairement FERMES en fin de journée et les WE
pour éviter les apports solaires thermiques .



Eclairage sur un poste de travail d'un bureau orienté au sud en HIVER
Les STORES sont volontairement OUVERTS tous les soirs et les WE
pour profiter des apports solaires thermiques du WE.

3.2.3 Satisfaction des usagers concernant ces protections solaires



3.2.4 Limites des protections solaires installées

Les Brises Soleil Orientables

Ils ont été installés au sud et sont utilisés en période estivale. Ils jouent bien leur rôle de protection contre l'éblouissement direct/diffus et contre les apports solaires estivaux. Ils sont faciles à commander (motorisation électrique, inverseur montée/descente).

En revanche les consignes concernant leur position / orientation varient suivant la saison (été ou hiver, l'heure de la journée, l'étage (intrusion ou pas), le jour de la semaine, comme indiqué au paragraphe précédent. C'est un peu dur à assimiler pour les usagers. Une solution de gestion centralisée pourrait être envisagée pour des locaux avec des usagers moins investis qu'à Enertech.

Les stores intérieurs (roulants ou californiens) :

La toile a été soigneusement sélectionnée pour être translucide mais permettre la protection contre l'éblouissement quand le soleil est dans le champ de vision.

Les stores enrouleurs ne sont pas efficaces à l'ouest : il faut les fermer complètement pour se protéger du soleil couchant, ce qui empêche la vision vers l'extérieur et ne permet pas de profiter de l'éclairage diffus. Ils ont été remplacés par **des stores à lames verticales intérieures** sur les autres bureaux qui permettent de se protéger de l'éblouissement direct, tout en conservant une vue vers l'extérieur et profiter de l'éclairage diffus.

Il est nécessaire de prendre du bon matériel pour que les mécanismes résistent longtemps à l'usage manuel quotidien (en hiver) de ces stores. Une commande électrique pourrait être envisagée pour limiter les sollicitations et augmenter leurs durées de vie.

Les volets bois :

Témoignage des utilisateurs :

- « *Concernant l'éblouissement, il provient de l'éclairage rentrant par la fenêtre ouest. Les volets coulissant bois sont trop lourd, pas assez mobile et trop opaque pour être utilisé efficacement* »

- « *L'éblouissement est difficile à gérer dans un bureau à double orientation (sud et ouest) et aménagé à 4 bureaux. Nous n'avons pas trouvé de disposition satisfaisant tout le monde.* »

Les volets bois ont été retenus pour les protections Est et Ouest. Cependant ils sont problématiques car :

- ils sont difficilement manipulables : il faut se pencher par la fenêtre pour les tirer. Certains volets coulissants ne coulissent plus correctement (réparation attendue).
- ils nécessitent de laisser un espace d'un mètre devant la fenêtre pour pouvoir ouvrir/fermer tous les jours ces volets. Ceci impose de pousser les bureaux vers le fond de pièce moins bien éclairé.
- ils sont totalement opaques. Une fois fermés pour se protéger des surchauffes et de l'éblouissement en été il est indispensable d'allumer l'éclairage artificiel dans les bureaux orientés uniquement à l'ouest. Dans les open-space orientés sud-ouest, il est parfois nécessaire également nécessaire d'allumer tout l'open-space pour que le bureau situé au nord-ouest de l'open-space ait suffisamment de lumière.
- **Solutions envisagées** : ajouter des volets à lames verticales fixes orientables à commande manuelle pour la façade ouest de Lowcal -6 baies du RDC et du R+1). Modèle type Tamaluz – Tamilip 20 dans l'épaisseur du mur côté extérieur.



3.3 Équilibre des luminances au poste de travail

3.3.1 Ambiance colorée

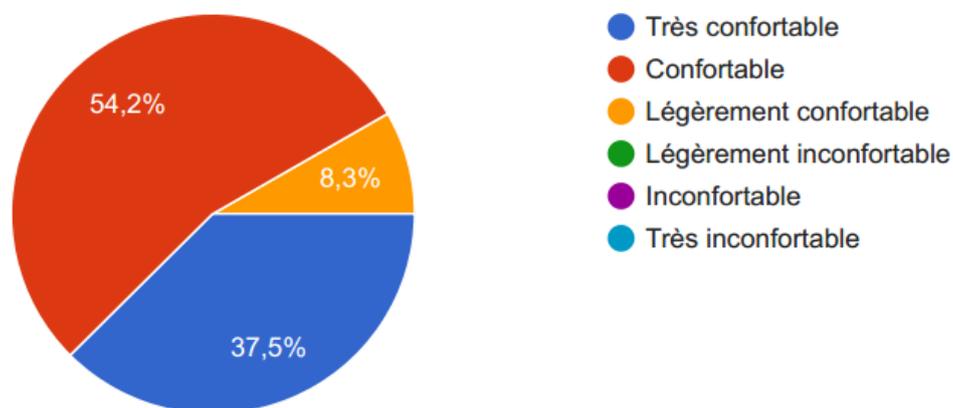
Les matériaux utilisés sont particulièrement « chauds » : le bois au plafond, la peinture des murs cassée « teinte Curry », et le sol souple jaune. A noter que la couleur jaune du sol a fait l'objet d'un vote par les usagers parmi une dizaine de teintes proposées par le fabricant retenu. D'un point de vue psychophysologique, les couleurs chaudes ont une action tonique et dynamisante, favorable au travail manuel. Alors que les couleurs froides (bleues, vertes) ont une action calmante et reposante convenant aux occupations sédentaires.

Dans le champ visuel ce sont les murs blancs et le mobilier en bois qui prédominent. Elles sont relativement claires (réflexion >50% pour le mobilier et les murs).

Facteur de réflexion du sol	Sol souple jaune	30%
Facteur de réflexion des murs	CAPAROL - Capaqua soie - teinte Curry 25	70%
Facteur de réflexion du plafond	Planche de bois clair (pin)	50%

Comment trouvez-vous l'ambiance colorée de votre bureau (murs, sol, plafond, ameublement)?

24 réponses



En ce qui concerne l'équilibre des luminances, on préconise habituellement les rapports maximaux suivants :

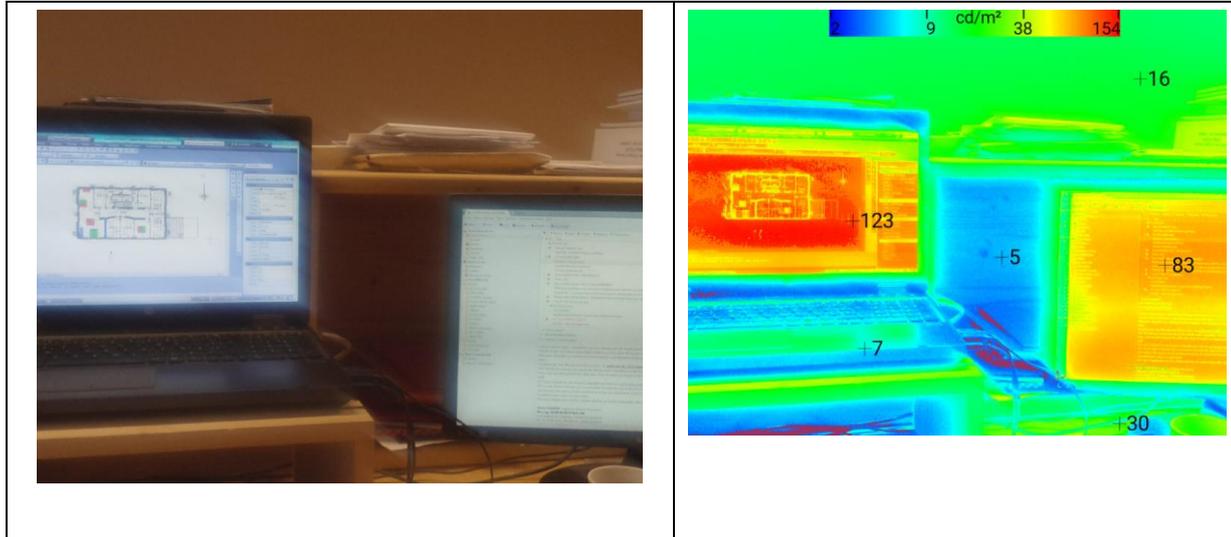
- 1/3 dans l'ergorama
- 1/10 dans le panorama
- 1/40 dans l'ensemble du local.

Mais des études actuelles ont montré que ces ratios sont très difficiles à respecter et que leur dépassement n'implique pas toujours des problèmes d'éblouissement.

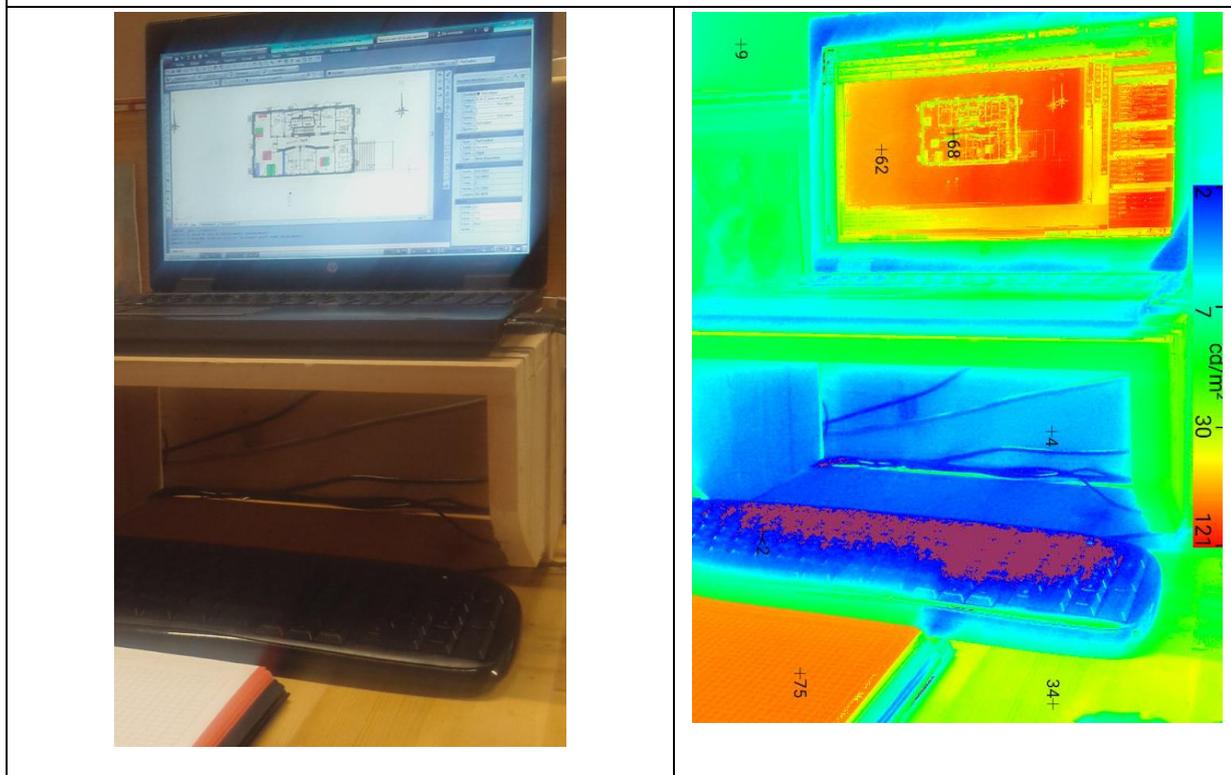
A l'aide du logiciel Photolux du LGCB de l'ENTPE étalonné pour tablette Nexus 10, nous produisons une carte des luminances de la scène à partir des images photographiées. Le mode de photographie HDR est utilisé car il permet de capturer une plus grande gamme de luminances.

En condition d'éclairage artificiel on observe une luminance faible des claviers d'ordinateurs et des bords d'écrans, et des étagères.

Les images suivantes représentent les cartes de luminance pour un poste de travail type : à gauche la photo classique, qui est traduite à droite en carte de luminance.



Sur la carte ci-dessus, la luminance de l'écran de gauche est 50 % supérieure à celui de droite ce qui peut provoquer une fatigue visuelle. Le contraste entre l'écran et le fond est de l'ordre de 8 dans cette direction du regard.



La luminance de la feuille blanche (75 cd/m^2) est proche de la luminance de l'écran (110 cd/m^2).

Le contraste écran / fond est proche de 12 ce qui est correct.



***Equilibre des luminances poste de travail - éclairage artificiel.
Le luminaire en limite de champ visuel peut provoquer une gêne en limite de panorama
quand le regard est trop orienté vers le haut***

3.3.2 Luminance des écrans d'ordinateurs

Concernant les luminances et les contrastes, nous préconisons des luminances des écrans de l'ordre de 100 à 150 cd/m², pour maintenir un contraste de 1 à 10 avec luminance de fond. Celle-ci est en moyenne de 16 cd/m² pour nos bureaux.

Un mauvais réglage des luminances peut induire une fatigue visuelle due :

- à une luminance trop élevée de l'écran
- à un écran de trop faible luminosité
- à un contraste trop élevé entre la luminance de l'écran et la luminance de fond.
- à une différence de luminance importante entre l'écran principal et l'écran secondaire lorsqu'ils sont utilisés côte à côte.

Nous avons relevé les luminances des écrans à un moment donné. Les mesures réalisées sont présentées dans le tableau du § 4.3.

A noter que les usagers ne modifient que très rarement la luminance de leur écran principal et encore moins celle de leur écran secondaire. Il n'y a pas d'adaptation automatique de la luminosité de l'écran en fonction de la luminosité ambiante.

La moyenne des luminances relevées sur 26 écrans (principal ou secondaire) est égale à 140 cd/m².

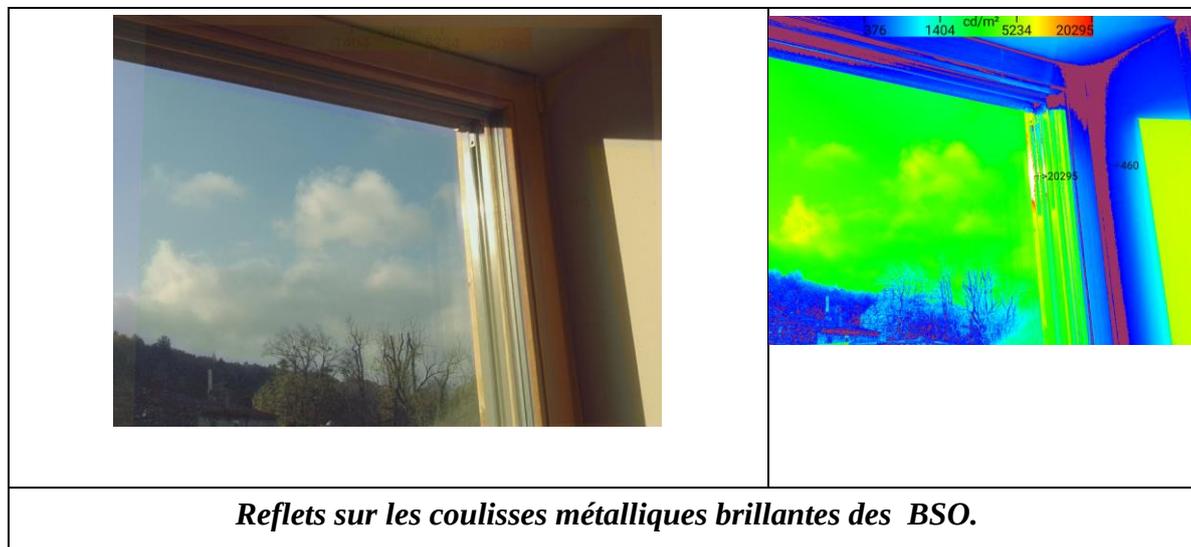
Ceci induit des surconsommations électriques des écrans dont la luminance est supérieure à 200 cd/m². 3 utilisateurs ont réglé la luminosité de leur écran à plus de 200 cd/m² et ne s'en rendaient pas compte. Ils ont été d'accord pour la réduire une fois informés.

Deux des 3 utilisateurs aux écrans peu lumineux sont satisfaits de cette situation et ne souhaitent pas la modifier. Le dernier a réglé la luminance de son ordinateur portable à 100 cd/m².

3.3.3 Autres causes d'éblouissement

Les coulisses des BSO extérieurs ainsi que les intercalaires des vitrages peuvent également être source d'éblouissement ponctuel d'inconfort, nécessitant une protection.

Les images ci-dessous indiquent le reflet du soleil levant sur les coulisses des BSO qui se produit tous les matins au printemps dans un bureau orienté sud à l'étage.



Il aurait été préférable de sélectionner des coulisses et des intercalaires foncés (noirs plutôt qu'en aluminium) et revêtus de peinture mate plutôt que brillante.

4 Eclairage artificiel

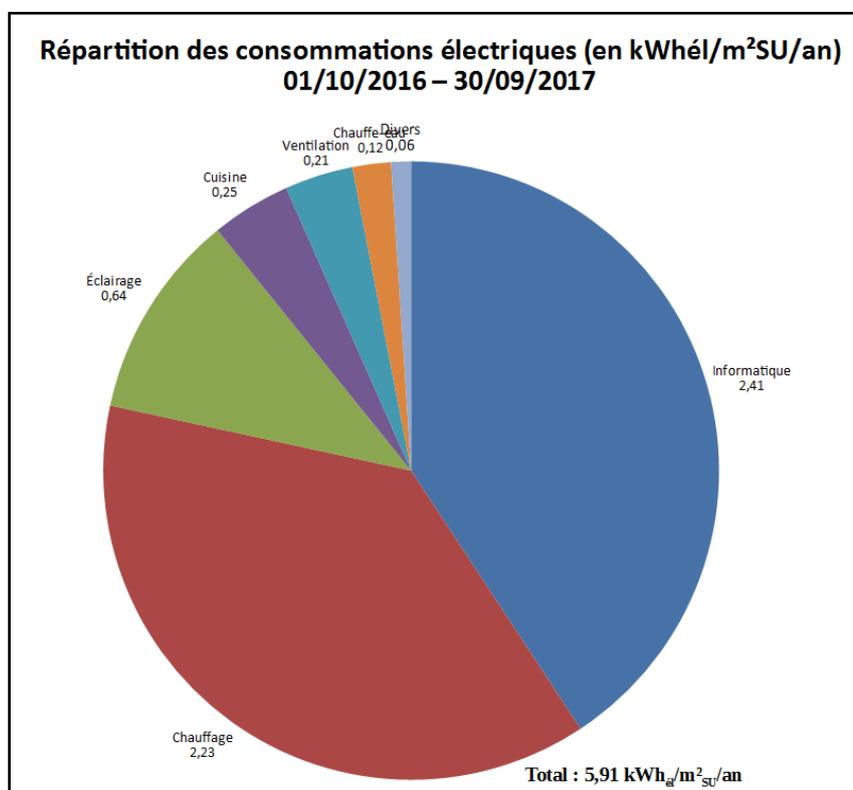
4.1 Mesure des consommations d'éclairage

Le graphe ci-dessous indique la répartition des consommations électriques dans le bâtiment Lowcal durant la campagne de mesure du au mesurées durant la première année d'occupation.

On peut noter que la consommation d'éclairage est particulièrement faible :

- en valeur relative, la consommation d'éclairage représente seulement 8,3 % de la consommation totale de Lowcal
- en valeur absolue, la consommation d'éclairage représente moins de 0,64 kWh_{el}/m²/an, ce qui est particulièrement bas pour ce type d'usage. Nous mesurons couramment plus de 10 kWh_{el}/m²/an sur des opérations de bureaux neuf et ancien.

Ceci nous montre que l'autonomie en éclairage naturel est très élevée, et que les puissances installées (W/m²) des luminaires sont faibles . La puissance installée dans les bureaux est de 2,3 W/m² en moyenne.



Type	Conso. Annuelle 1ère année (kWh/an)	Part de la consommation totale
Éclairage circulations	90	2,5%
Éclairage extérieur	1	0,03%
Éclairage pièces	304	8,3%
TOTAL BATIMENT	3665	100%

Plus de 3/4 de la consommation est due à l'éclairage des pièces, principalement des bureaux. C'est donc sur eux que nous concentrons notre étude.

4.2 Les luminaires utilisés dans les bureaux

4.2.1 Les plafonniers

Bureaux luminaire led Sylvania RanaLed 21W 2000 lm efficace	Locaux divers de passage : SFEL Tumo Led 10W - 1000 lm efficace
	

D'un point de vue social et cycle du vie des produits, nous avons privilégié les produits fabriqués en France, ainsi :

- à gauche, les luminaires SYLVANIA RanaLed sont assemblés à Saint Etienne (42)
- à droite, les luminaires SFEL Tumo sont assemblés à Saulgé (86) vers Poitiers. Ils sont utilisés dans les espaces de passage des open-space ainsi que dans le réfectoire et le local reprographie.

Les simulations d'éclairage ont montrées que les luminaires de bureaux à faible éblouissement (UGR) du marché sont trop puissant pour nos bureaux ayant une hauteur sous plafond de 240 cm. Nous n'avons pas réussi à trouver des luminaires à faible UGR dans le flux est inférieur à 3000 lm par luminaire. Ainsi, nous avons demandé au fabricant de luminaire (Sylvania) de baisser le flux initial de 3000 lm à 2000 lm pour une puissance initiale de 30W (catalogue) à 21W mesuré.

En effet, la norme réalisée par les fabricants d'éclairage (qui n'est en aucun cas légale) indique un éclairage requis sur les bureaux de 500 lux. Lors d'un sondage que nous avons réalisé auprès de plusieurs dizaines d'employés dans les bureaux de la région PACA, nous nous sommes aperçu que 15% des utilisateurs se plaignent de suréclairage à 500 lux. Les employés ayant un éclairage compris entre 200 lux et 300 lux sur le plan de travail ne se plaignaient pas de sous éclairage.

4.2.2 Les lampes de bureau

Seuls 6 postes de travail sur 27 sont équipés d'une lampe de bureau.

Les observations relevées dans les questionnaires concernant ces lampes d'appoint sont les suivantes :

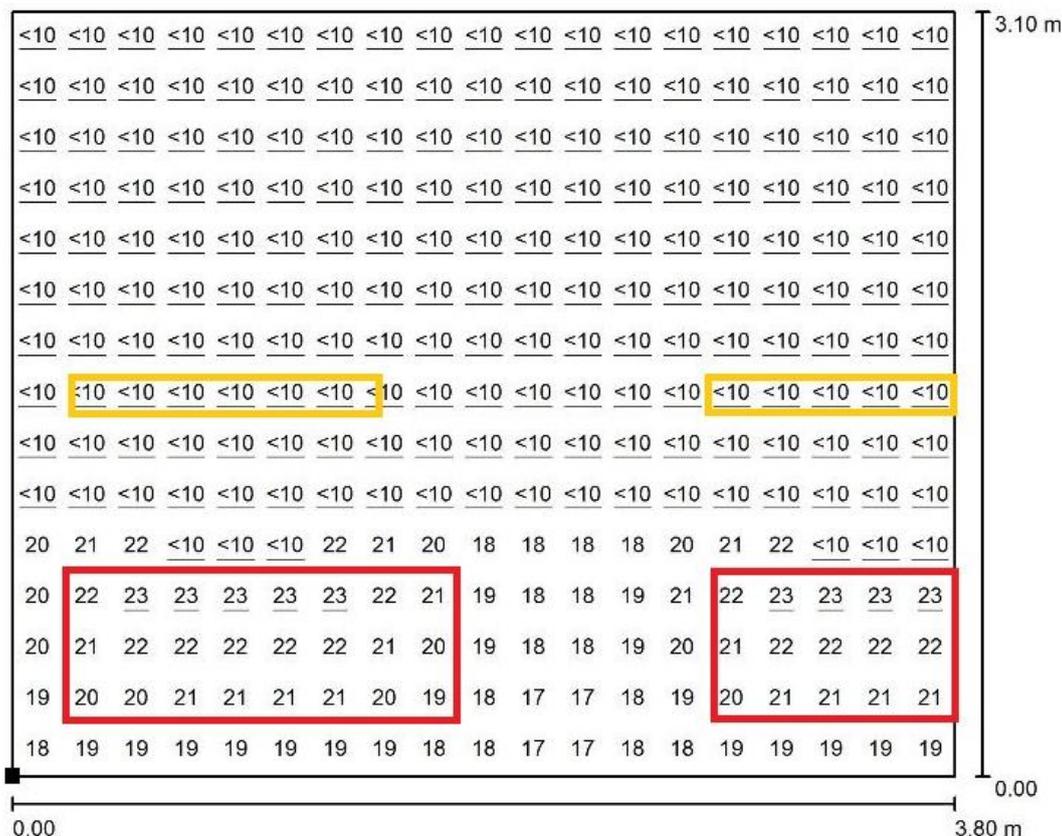
- « Il faut que je trouve une lampe de bureau qui éclaire devant mon ordi sans m'envahir l'espace et sans éblouir mon voisin d'en face »
- « Ayant eu un éclairage d'appoint , je me suis rendu compte que je ne l'ai jamais utilisé ! Pas de nécessité finalement. »

- « j'en ai une mais je ne l'utilise que très très rarement. »
- « Concernant l'utilisation de la lampe de bureau : très occasionnel, quand je suis seule au bureau en fin de journée, ou lorsque les collègues ne souhaitent pas allumer les plafonniers. »
- « L'éclairage du bureau (naturel et artificiel commun) est de qualité suffisante pour ne pas avoir besoin d'une lampe d'appoint individuel »

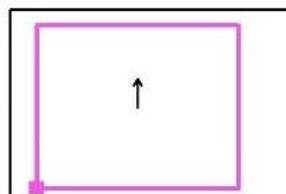
Les lampes de bureau sont donc principalement utilisées par 3 personnes dont le bureau est situé à l'ouest (ou sud-ouest) en été lorsque les volets bois sont fermés et qu'ils ne souhaitent pas allumer les plafonniers. Ou bien en hiver dans les open-space quand un utilisateur est seul.

L'usage des lampes de bureau est marginal sur Lowcal.

4.2.3 Éblouissement (UGR)



Position de la surface dans la pièce:
 Point marqué: (0.500 m, 0.200 m, 1.200 m)



Luminaire: HAVELSSYLVANIA 0051210 RANA LED D W CM+P 1*LH 4K
Lampes: 1 x RANA LED 1200 CM+P 1*LH 4K

Gamma	C 0°	C 15°	C 30°	C 45°	C 60°	C 75°	C 90°
0.0°	21427	21427	21427	21427	21427	21427	21427
5.0°	20917	20896	20854	20833	21114	21307	21631
10.0°	21588	21626	21732	21520	21112	21056	21634
15.0°	22694	22495	21988	21455	21715	21035	21672
20.0°	24321	24063	23305	22428	21618	21217	21502
25.0°	25988	25812	24944	23328	22003	21047	21038
30.0°	26071	25882	25206	24017	21934	20277	20199
35.0°	22397	22658	23521	22939	20941	18995	19010
40.0°	16750	17274	18749	19979	19159	17498	17586
45.0°	12192	12689	14252	16323	16637	15684	15548
50.0°	7689	7787	9564	11576	13581	12787	12572
55.0°	5531	5873	6968	7807	9507	9106	9412
60.0°	4227	4336	4972	4645	4788	5231	5365
65.0°	2486	2515	2486	1683	1129	891	356
70.0°	832	844	783	294	159	135	135
75.0°	517	453	291	162	113	97	97
80.0°	289	265	169	121	96	96	96
85.0°	192	192	144	96	96	96	96

La figure ci dessus représente la densité d'éclairage maximale du luminaire (en version 3135 lumens de base) pour un observateur dans le plan C90°est de 21427 cd/m². Comme les luminaires des bureaux sont bridés à 2000 lumens, cette luminance maximale est réduite à 13700 cd/m². Il n'y a pas de défilement avant gamma=30°.

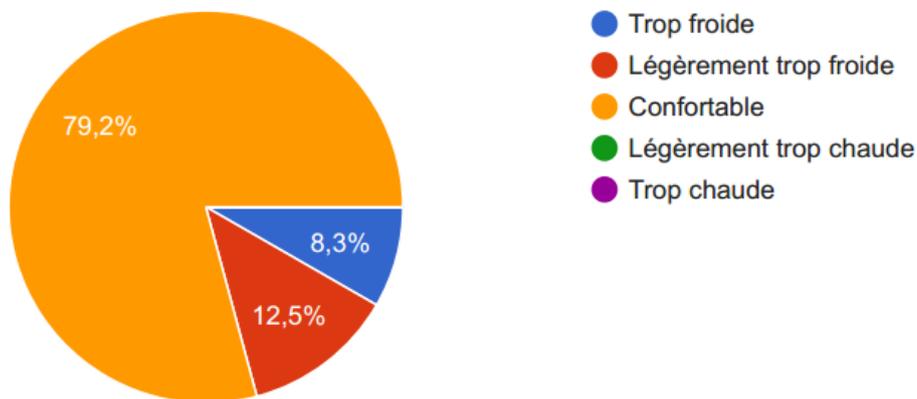
Dans les bureaux, on note un « léger » risque d'éblouissement lorsqu'on regarde en direction (perpendiculaire) du luminaire si l'on est situé à environ 1 mètre de l'axe. Cette situation existe, mais peu de gens sont réellement gênés. Le dépassement d'UGR est relativement faible (UGR max =22), et n'est réellement gênant que lorsque le regard dépasse l'horizontal.

4.2.4 Température de couleur des sources lumineuses

La température de couleur retenue pour l'éclairage des bureaux est de 4000°K.

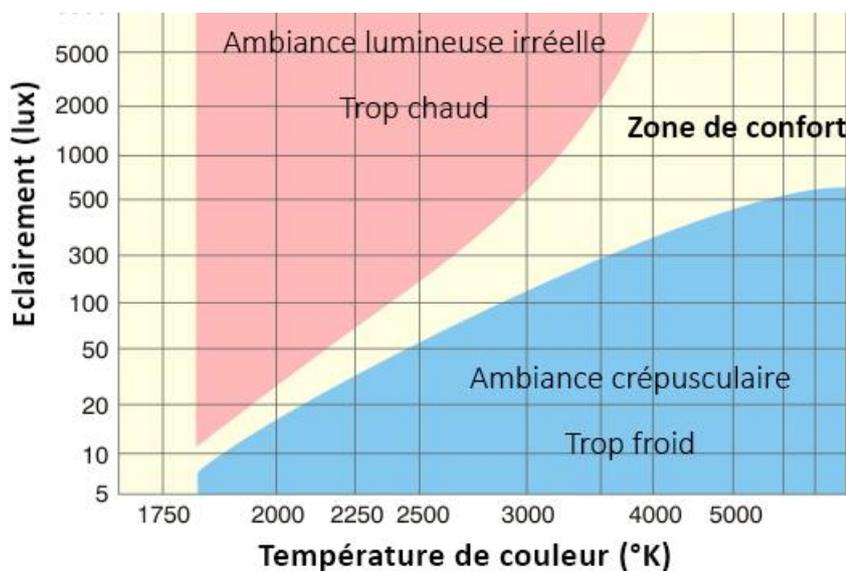
Comment trouvez-vous l'éclairage artificiel de votre poste de travail ?

24 réponses



Les usagers sont globalement satisfaits de la température de couleur de lumière « neutre » retenue dans l'ensemble des locaux de LowCal.

5 personnes estiment qu'elle est légèrement trop froide ou froide. Cette sensation est tout à fait conforme aux zones de confort définies par la règle de Kruithoff : pour une température de couleur de 4000°K, l'ambiance est jugée confortable pour un éclairage supérieur à 350 lux. Pour les 8 usagers de Lowcal dont l'éclairage est inférieur à 350 lux, l'ambiance paraît donc « trop froide » ou crépusculaire selon ce diagramme.

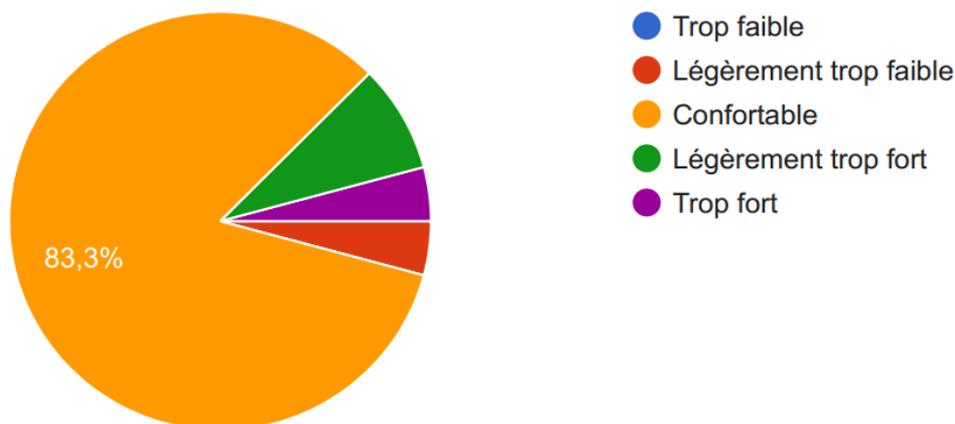


Pour des éclairages compris entre 100 et 500 lux à LowCal, une température de couleur comprise entre 3000°K et 3500°K aurait peut-être convenue à plus de personnes.

4.3.2 Satisfaction des usagers

Comment trouvez-vous le niveau d'éclairage artificiel de votre poste de travail ?

24 réponses



Une personne estime que l'éclairage est trop fort : l'éclairage mesuré est de l'ordre de 300 lux. Il apparaît après discussion que c'est la température de couleur (trop « blanche » selon elle à 4000°K) qui la gêne plutôt que le niveau d'éclairage qui « convient bien ».

Deux personnes estiment que l'éclairage artificiel est légèrement trop fort : les mesures indiquent 220 lux et 230 lux. Elles travaillent sur écran informatiques avec peu de besoin de lecture à côté. Pour elles un éclairage de 150 à 200 lux sur plan de travail serait préférable.

Une personne estime que l'éclairage artificiel est légèrement trop faible à son poste. L'éclairage mesuré est de 130 lux au niveau du clavier et 240 lux au niveau de la zone de lecture. On note à ce poste que :

- la luminance de l'écran est forte 265 cd/m²
- le luminaire est placé dans le dos du travailleur créant une ombre portée sur les documents.

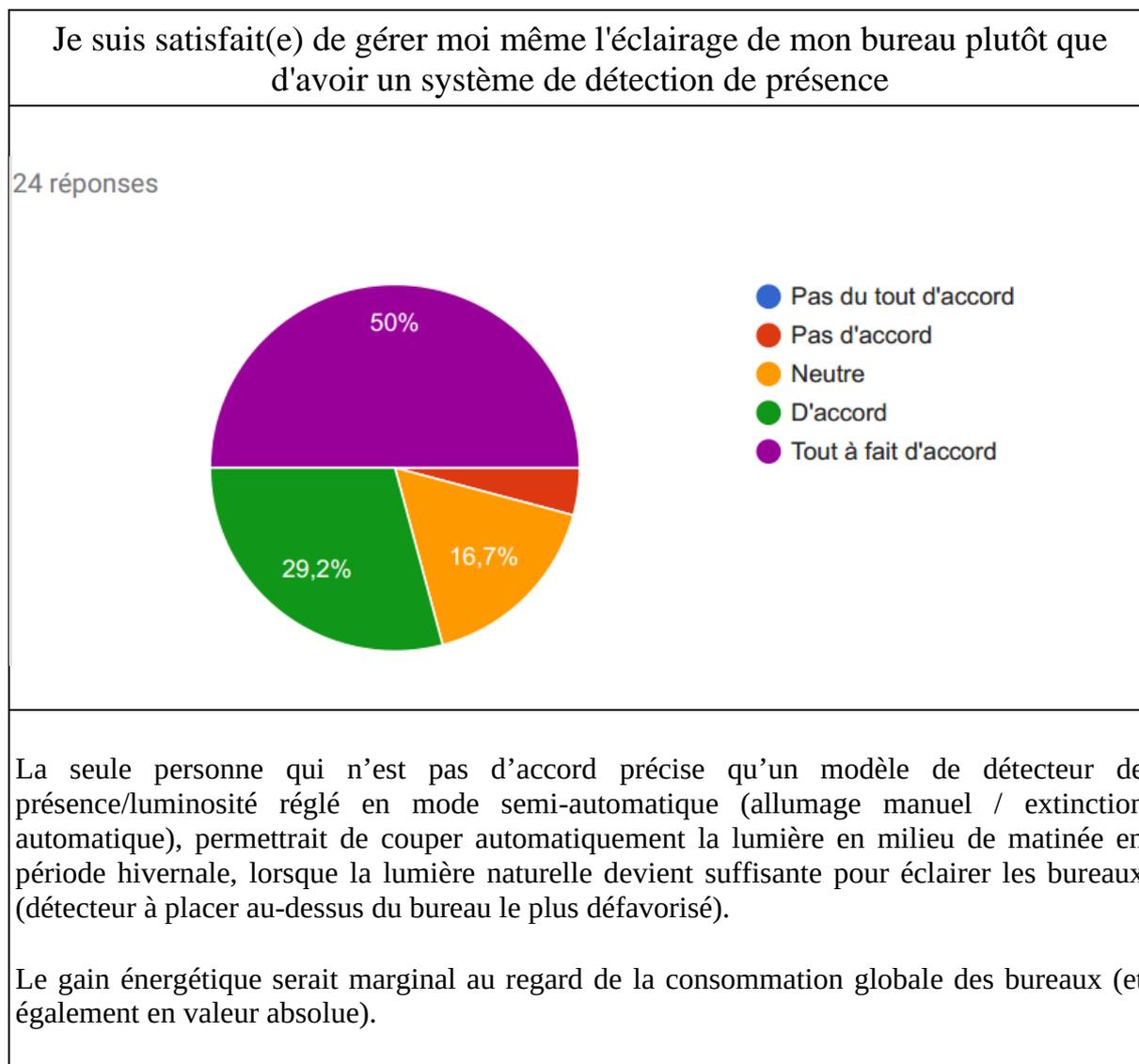
Cette situation est due au mauvais emplacement des bureaux dans la pièce, du fait des coulissants non motorisés en façade ouest qui imposent une ouverture des fenêtres en été et interdisent de placer les bureaux à l'endroit prévu (devant la fenêtre).

4.4 Allumage extinction des luminaires

Dans tous les bureaux, il a été prévu l'utilisation d'interrupteurs simple allumage à l'entrée de chaque local pour commander les plafonniers de l'ensemble de la pièce (Lowtech).

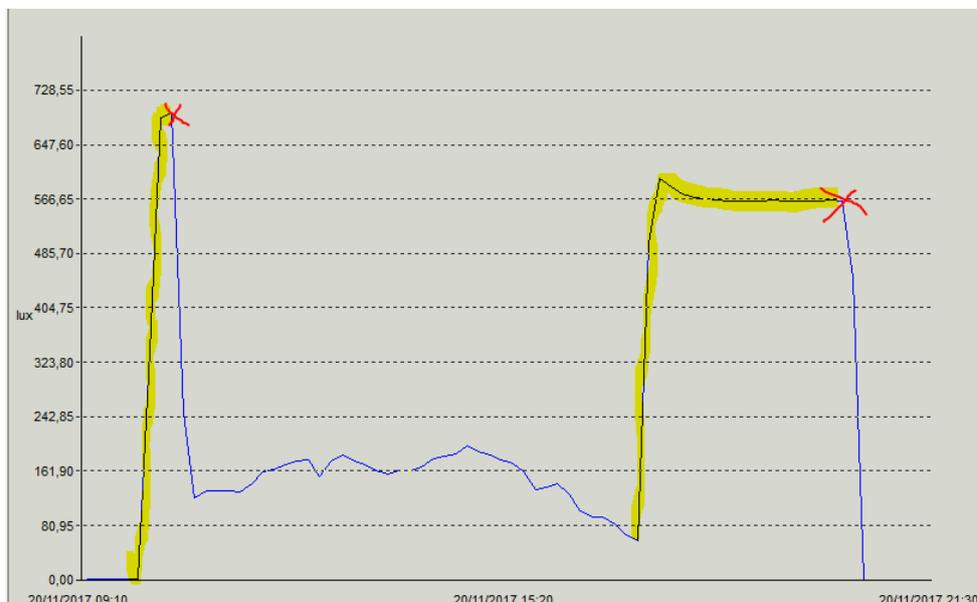
Les détecteurs de présence ont été volontairement écartés pour les bureaux afin de réduire l'énergie grise et la consommation de veille liés à la mise en place de ces systèmes de commande (en mode automatique ou semi-automatique).

Le graphe ci-dessous indique la satisfaction des usagers.



Les mesures confirment que les détecteurs de présence seraient inutiles à Lowcal : les usagers sont sensibilisés et pensent à éteindre l'éclairage lorsqu'ils s'absentent (le midi et le soir). Il y a très peu d'oubli.

Pour certains bureaux individuels, la détection de luminosité serait même inutile, car l'occupant éteint manuellement les plafonniers dès que la luminosité extérieure est suffisante (voir figure ci-après).



Eclairage en lux sur le plan de travail d'un bureau orienté nord fin octobre :
L'éclairage est allumé (en jaune) en début de journée de travail, et vers 17h lorsque l'éclairage naturel devient insuffisant

La figure précédente indique les niveaux d'éclairage relevés dans un bureau orienté nord. Les croix rouges indiquent les actions volontaires d'extinction.

Les paramètres intéressants sont :

- l'heure d'extinction de l'éclairage artificiel matinal. Il est délicat pour l'utilisateur de juger a priori quel sera l'éclairage naturel après extinction de l'éclairage artificiel ($E_{naturel} = E_{total} - E_{artificiel}$).
- le niveau d'éclairage minimum du réallumage de l'éclairage artificiel de l'après-midi. Il varie en fonction des utilisateurs et du travail effectué (écran ou lecture / écriture). En général il se situe entre 100 lux et 300 lux. Cette variation est d'autant plus rapide que le bureau est au sud près des fenêtres.

Pour réduire la consommation d'éclairage des bureaux, il semble difficile de sensibiliser les usagers à ne pas rallumer trop vite le soir, ou à ne pas allumer systématiquement le matin si l'éclairage leur semble suffisant.

Le seul paramètre qui semble optimisable est l'heure d'extinction matinale lorsque le luminaire est allumé le matin.

Une autre piste est d'éviter que des plafonniers soient allumés alors que les occultations sont baissées sans nécessité. Le personnel d'Enertech est sensibilisé à cette question et cette situation est marginale. L'extinction sera d'autant plus facile si l'utilisateur est dans un bureau où il est seul.

Il est cependant difficile par ciel de traine (alternance nuage / soleil) d'aller et venir vers l'interrupteur pour éteindre les plafonniers de son bureau. C'est là qu'un détecteur de luminosité pourrait être intéressant.

4.5 Autonomie en éclairage naturel

D'après les abaques d'éclairement horizontal extérieur pour la latitude du site (44,6° nord), l'autonomie en éclairage naturel sur l'année entre 9h et 17h pour 250 lux est égale à 85 %. Elle serait de l'ordre de 60 % à 500 lux.

Cependant les horaires de travail à Lowcal sont plus étalées. Les bureaux sont ouverts typiquement de 7h30 à 19h30 en semaine.

Et le FLJ varie de façon importante d'un poste à l'autre, ainsi que les besoins de chacun.

Il est donc intéressant d'estimer l'autonomie réelle de chaque bureau à partir des mesures que nous avons pu réaliser.

Nous avons pu mesurer les durées de fonctionnement des plafonniers dans chaque bureau durant 6 mois. En extrapolant à partir des relevés de consommation d'éclairage de l'ensemble des bureaux sur un an, nous pouvons obtenir un ordre de grandeur des taux d'autonomie en éclairage naturel dans le bâtiment Lowcal. Les temps de présence sont déduits des consommations des postes informatiques.

Hypothèses :

On considère ici la durée complète de la journée de travail. L'autonomie indiquée est donc

$$A(\%) = 1 - (\text{durée d'éclairage artificiel} / \text{durée de la journée de travail devant écran})$$

Exemple : une personne arrive à 8h et repart à 18h en prenant une heure de pause le midi. Elle travaille 9h devant son écran, et allume 3h les plafonniers de son bureau. $A\% = 1 - 3/9 = 66,6\%$

	Bureau individuel RDC-SUD	Open-space RDC sud-ouest	Bureau individuel R+1-SUD	Open-space R+1 sud-ouest
janvier	59%	18%	48%	48%
février	53%	21%	57%	65%
mars	58%	22%	64%	81%
avril	50%	45%	90%	90%
mai	70%	45%	85%	86%
juin	81%	76%	97%	97%
juillet	93%	81%	97%	97%
août	89%	57%	96%	96%
septembre	86%	33%	94%	97%
octobre	79%	37%	71%	80%
novembre	67%	36%	50%	55%
décembre	47%	25%	36%	28%
Autonomie moyenne (%)	69%	41%	74%	77%

Ce tableau indique que l'autonomie réelle sur 3 bureaux représentatifs du bâtiment est comprise entre 69 % et 77 %. C'est une valeur élevée qui montre que l'éclairage naturel est important et les utilisateurs sensibilisés à l'extinction des luminaires.

L'exception est l'open-space du RDC qui a selon cette estimation une autonomie de 41 % seulement.

La comparaison entre les niveaux du RDC et étage sont significatives.

Durant les mois d'hiver, les consommations sont comparables sur les parties ouest du RDC et de l'étage.

En revanche du 21 mars au 21 septembre, les bureaux du RDC ouest consomment 3 fois plus que les bureaux du R+1 Ouest.

Ceci s'explique par le fait que le grand bureau d'angle sud-ouest, les Brise-soleil sont systématiquement baissés partiellement au sud, et les volets complètement fermés en façade ouest pour réduire les apports solaires et éviter l'éblouissement. L'un des bureaux est placé en fond de pièce (FLJ<1,5%) et l'utilisateur a souvent besoin d'un éclairage supérieur à 300 lux pour lire des documents papiers.

Comme il n'y a qu'un seul circuit de commande pour l'éclairage artificiel de l'ensemble du bureau, l'éclairage artificiel reste longtemps allumé en été ce qui grève l'autonomie de ce bureau.

Les solutions envisagées sont :

- créer un nouveau circuit d'éclairage pour commander le plafonnier du coin le plus sombre individuellement
- équiper l'utilisateur d'une lampe de bureau efficace (qui n'empiète pas sur le bureau et n'éblouisse pas la personne en face).
- de remplacer les volets coulissants extérieurs par des brise-soleil verticaux à lame orientables (cf§ 3.3.4).

5 Conclusion

Cette campagne de mesure est riche d'enseignements qui serviront pour les conceptions des futurs projet de type LowCal.

Voici les principaux enseignements :

- une étude FLJ sur l'ensemble des locaux du bâtiment permet de déterminer les emplacements propices à l'installation des meubles de bureaux et donc des luminaires
- l'emplacement du mobilier (bureaux/étagères) sur les plans architecturaux très tôt dans la phase de conception (APS ou APD), en tenant compte des contraintes (dégagement nécessaire à l'ouverture des fenêtres, taille et forme du mobilier réel, et des risques d'éblouissement). Les bureaux sont en général placés perpendiculairement aux fenêtres.
- des occultations intérieures (pour l'hiver) et extérieures (pour l'été) pour le l'Est / le Sud / l'Ouest sont systématiquement nécessaires pour le confort thermique et visuel.
- les occultations extérieures doivent être facilement manœuvrables, et si possible depuis l'intérieur par commande électrique. Envisager la possibilité d'une commande centralisé automatique pour gérer les commandes d'ouverture / fermeture en fonction des consignes.
- le choix du bon type de protections pour les façades Est et Ouest : stores californiens à l'intérieur, et volets ou brises soleil à lames verticales orientables à l'extérieur est primordial.

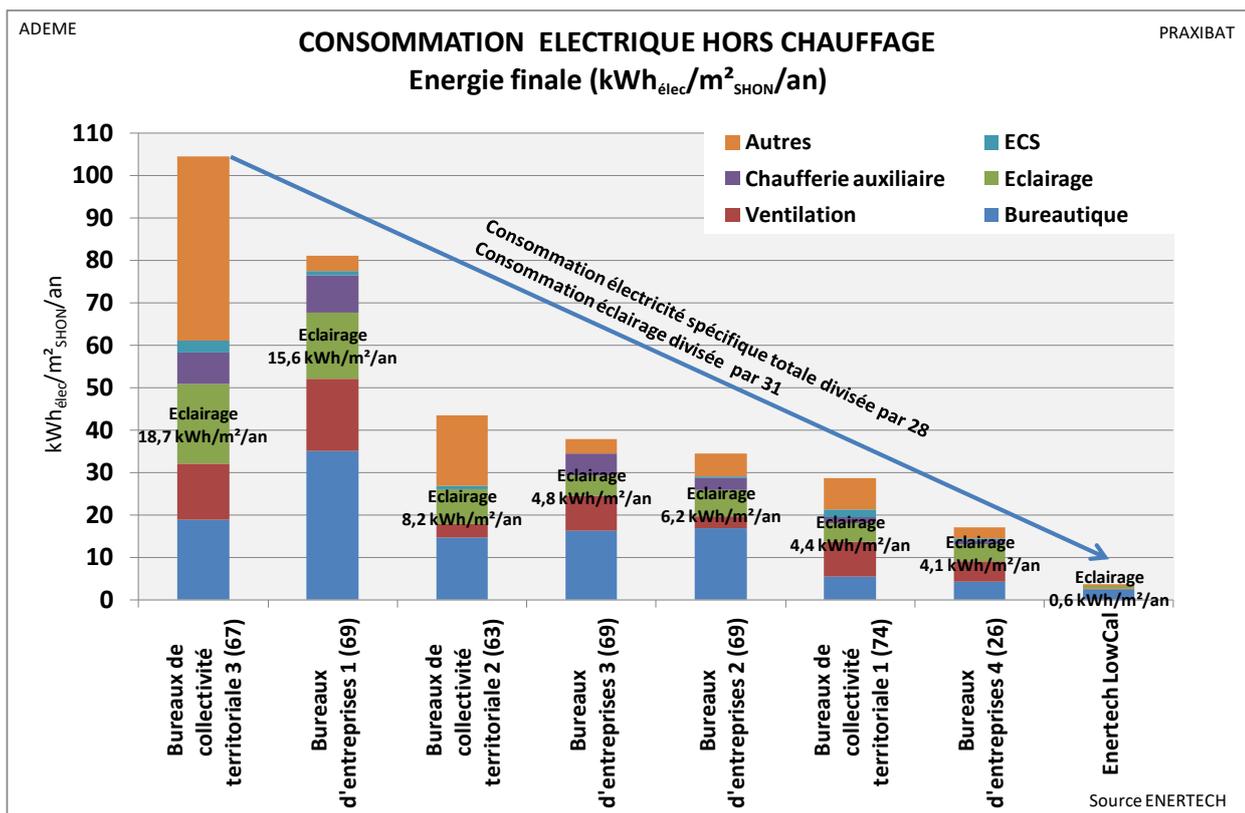
Le confort visuel dans les bureaux de Lowcal est très bon en moyenne, tant au niveau de l'éclairage naturel que de l'éclairage artificiel.

Nos mesures prouvent qu'un éclairage artificiel moyen de 300 lux convient à la plupart des travailleurs sur écran en condition normal. L'appoint à 500 lux par lampe de bureau est quasiment inutile.

Aucune situation d'inconfort mentionné n'est irrémédiable, un repositionnement des bureaux ou des luminaires est toujours possible.

La configuration des bureaux permet d'estimer que l'autonomie réelle moyenne en lumière du jour est comprise entre 70 % et 80 % la première année.

Ces dispositions permettent à la fois de garantir un confort visuel très satisfaisant à la grande majorité des usagers, tout en consommant moins de 0,7 kWh d'électricité / m²-SU / an pour l'éclairage, ce qui est un niveau exceptionnel pour un bâtiment de bureau livré en 2015.



Consommation d'électricité tous usages y compris éclairage (en vert) hors chauffage de 8 bâtiments tertiaires mesurés par Enertech

La consommation d'éclairage des bureaux mesurée par Enertech est comprise entre 16 kWh_{élec}/m²/an sur un bâtiment non rénové de moins de 10 ans à Lyon à moins de 1 kWh_{élec}/m²/an sur les bureaux d'Enertech (LowCal).

Le rapport de consommation d'éclairage est de 1 à 31 en fonction de la conception de l'éclairage des bureaux !

Le pari de LowCal est donc tenu : réaliser une installation d'éclairage artificiel très peu consommatrice, tout en maintenant un confort visuel très satisfaisant pour les usagers, en éclairage naturel, mixte ou artificiel.