



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport final du 01.05.2014

PERFORMANCE GLOBALE EN ÉCLAIRAGE

GLOBAL LIGHTING PERFORMANCE

Mandant:
Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche : Energie in Gebäuden
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Mandataire:
Société Estia SA
EPFL Innovation Park
CH-1015 Lausanne
<http://www.estia.ch>

Auteurs:
Bernard PAULE, Société Estia SA, paule@estia.ch
Julien BOUTILLIER, Société Estia SA, boutillier@estia.ch
Samuel PANTET, Société Estia SA, pantet@estia.ch

Responsable de domaine de l'OFEN:	Andreas ECKMANN
Chef du programme de l'OFEN:	Rolf MOSER
Numéro du contrat de l'OFEN:	SI/500847-01

Le ou les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Résumé

Ce projet a porté sur l'analyse de l'usage effectif des protections solaires dans les bureaux, et sur l'impact au niveau du potentiel d'utilisation de la lumière du jour à l'intérieur des locaux.

La première partie du projet a permis d'observer, pour 4 bâtiments administratifs, l'usage réel des protections solaires lorsque la commande n'est pas automatisée (webcams en service du 01-02-2013 au 31-01-2014, sur 125 ouvertures, soit plus de 500'000 positions de stores analysées).

L'information principale est que les protections solaires sont très peu et très mal utilisées (moins de 2 mouvements par stores / semaine) quelle que soit l'orientation ou la saison. La conséquence de cette mauvaise utilisation est que la contribution de la lumière naturelle est loin d'être optimisée.

La deuxième partie du projet a porté sur la simulation de la contribution effective de la lumière du jour dans chacun des locaux observés (Simulations DIAL+/Radiance). Ceci nous a permis de comparer les résultats avec ceux qui auraient été atteints avec une régulation automatisée de la position des stores.

Les résultats de ces simulations ont ensuite été utilisés pour estimer la consommation d'électricité liée à l'éclairage. Ces travaux montrent que les gains énergétiques associés à l'automatisation des stores peuvent atteindre plusieurs de kWh/m² par local et par an.

La comparaison avec le mode de calcul de la Norme 380/4 actuelle montre que celle-ci sous-estime largement le potentiel lié à l'automatisation des protections solaires et surestime par ailleurs les effets de certains automatismes sur la commande de l'éclairage artificiel.

La conclusion principale de cette étude est que la mise en œuvre d'automatismes de stores permet d'augmenter sensiblement le nombre d'heures pendant lesquelles le recours à l'éclairage artificiel n'est pas nécessaire, tout en préservant le confort visuel et la liberté de choix des utilisateurs.

L'autre conclusion est que la Norme devrait davantage favoriser l'utilisation de la lumière du jour en imposant des objectifs spécifiques sur cette thématique.

Abstract

This project focused on the effective use of movable shading devices in offices, and on the impact on the indoor daylighting.

The first part of the project consisted in the observation of the actual use of sunscreens when the command is not automated (administrative buildings, operating webcams from 01-02-2013 to 31-01-2014 over 125 openings, e.g. more than 500'000 individual blind positions analysed).

The main information is that sunscreens are very few and poorly used (less than 2 movements blinds / week) regardless of the orientation or season. The consequence of this misuse is that the contribution of natural light is far from being optimized.

The second part of the project focused on the simulation of the actual contribution of daylight in each of the observed rooms (Simulations DIAL + / Radiance).

This allowed us to compare the results with those that would have been achieved with automated blinds.

The results of these simulations were then used to estimate the electricity consumption for lighting. This study shows that the energy savings associated with automated blinds can reach several kWh/m² per room and per year.

Comparison with SIA 380/4 calculations shows that the actual version of the Swiss Standard underestimates the potential related to blinds automation and also tends to overestimate the effects of artificial lighting automated control.

The main conclusion of this study is that the implementation of automatic blinds can significantly increase the number of hours during which the use of artificial lighting is not necessary, while preserving the visual comfort and freedom of choice for users.

The other conclusion is that the Swiss Standard should better promote the use of daylight by imposing specific targets on this topic.

Sommaire

Résumé	3
Abstract.....	4
Sommaire	5
1 Contexte.....	7
2 Objectif	8
3 Procédure / méthodologie.....	12
3.1 Bâtiments observés.....	12
3.2 Matériel d'observation	14
3.3 Observations	14
3.4 Période d'observation.....	15
4 Résultats / enseignements.....	17
4.1 Mouvement des stores	17
4.2 Contribution à l'éclairage naturel des locaux	25
4.3 Observation de la gestion de l'éclairage artificiel par les utilisateurs.....	30
4.4 Scénarios d'automatisation des stores	34
4.5 Stores à lames : Comparaison des valeurs utilisateurs avec les deux automatismes pour un éclairement requis de 500 lux	37
4.6 Etude de variantes de protections solaires.....	46
4.7 Consommation d'électricité liée à l'éclairage	56
4.8 Calculs selon la méthode d'autonomie en lumière diffuse.....	67
5 Discussion / évaluation des résultats / enseignements	74
5.1 Constats sur les protections solaires et leur utilisation	74
6 Conclusions et perspectives, étapes ultérieures.....	76
6.1 Recommandations pour l'actualisation de la norme 380/4.....	76
6.2 Collaborations nationales	79
6.3 Collaborations internationales.....	79
6.4 Perspectives	79
7 Références	80
8 Annexes.....	81
8.1 Profils d'autonomie pour le scénario Auto-OFF.....	81
8.2 Profils d'autonomie pour le scénario « Dimming ».....	83
8.3 Verres à teinte variable électroniquement.....	84

1 Contexte

Les protections solaires constituent un élément majeur de la performance énergétique des bâtiments, tant au niveau de l'éclairage qu'en ce qui concerne la thermique.

La double fonction des stores (protection contre l'éblouissement et protection contre la surchauffe) n'est cependant pas toujours clairement perçue par les utilisateurs.

Motivations pour baisser les stores

Schématiquement, l'utilisateur baisse volontiers les stores dans les deux cas de figure suivants :

- lorsqu'il est ébloui (soleil dans le champ visuel de travail).
- lorsqu'il a trop chaud (été ou mi-saison).

Motivation pour relever les stores

En raison de l'éclairage artificiel, qui permet d'atteindre les niveaux d'éclairement recommandés quelles que soient les conditions climatiques extérieures, la motivation pour relever les stores est, en revanche, beaucoup moins forte. Des tests réalisés en 2003 sur un bâtiment de l'EPFL montrent ainsi que l'utilisateur relève les stores principalement :

- lorsqu'il éprouve une sensation d'enfermement (stores complètement baissés, lames fermées).

Il résulte de ceci que lorsque les stores ne sont pas automatisés, ils sont souvent baissés inutilement, ce qui peut entraîner une sur-utilisation de l'éclairage artificiel.

Ce travail se propose de quantifier ces comportements, à travers l'analyse de bâtiments administratifs réels, et d'en mesurer les conséquences sur la consommation d'électricité liée à l'éclairage.

2 Objectif

Cette étude réalisée par Estia porte sur l'observation de la position des stores de 4 bâtiments de bureaux situés à l'EPFL-Innovation Park, à Lausanne.

Elle a pour objectif de caractériser l'usage des stores, lorsque la commande des protections solaires n'est pas automatisée.

Ce travail propose de mesurer les conséquences de ceci sur l'utilisation de la lumière naturelle dans les locaux.

Il vise aussi à établir des recommandations pour la révision de la Norme 380/4 portant sur l'éclairage.

L'observation a porté sur les fenêtres des étages R+1 à R+4 (cf. cadre orange sur la **Figure 1**).



Figure 1 : Photographie de la façade Ouest du bâtiment PSE-C, le 2 mai 2013 à 15h24, ciel couvert.

Cette image illustre bien le fait que la position des protections solaires est peu corrélée avec les conditions climatiques extérieures.

Ainsi, à l'instant où a été prise la photo, on peut constater (cf. Figure 2) que seules 11 fenêtres présentent des stores relevés alors que le ciel est couvert et que le risque d'éblouissement des utilisateurs est nul.

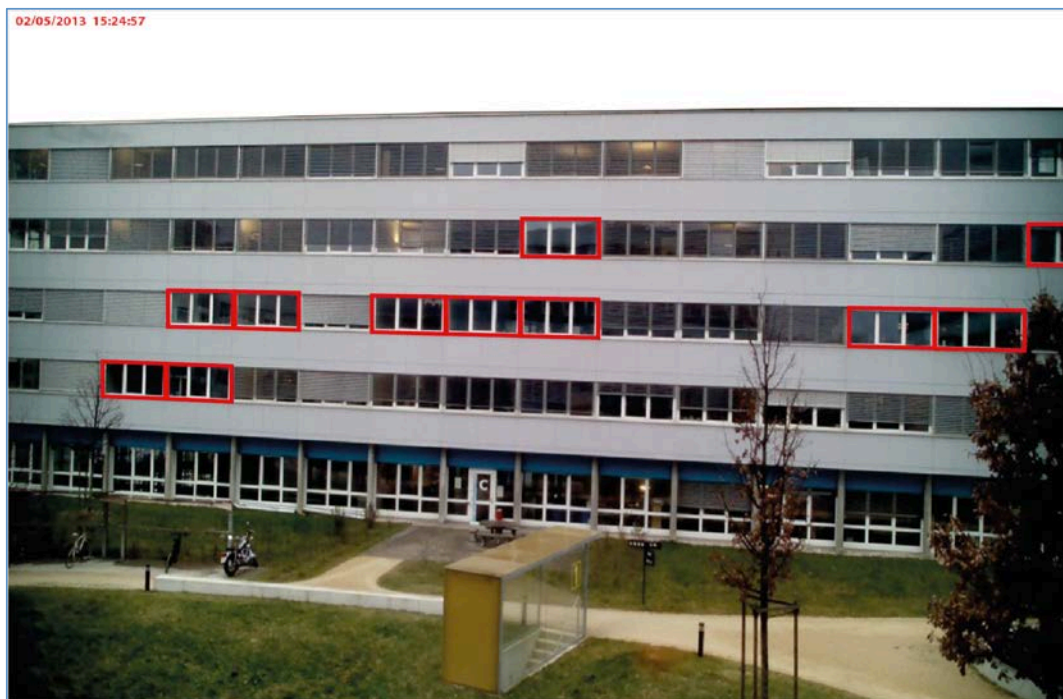


Figure 2 : Les stores sont complètement relevés sur seulement 11 des 58 fenêtres observées.

De plus on constate sur la Figure 3 que pour 7 fenêtres au moins, les stores sont complètement baissés et que la contribution de la lumière du jour dans les locaux concernés est donc presque nulle.



Figure 3 : 7 fenêtres présentent un store baissé entre 90% et 100%, avec les lames fermées.

Toujours sur le même exemple, on distingue sur la Figure 4 que l'éclairage artificiel est enclenché dans au moins 15 locaux dont les stores sont abaissés, alors que nous sommes en

plein après-midi au mois de mai (ce chiffre ne tient pas compte des locaux pour lesquels les stores sont complètement fermés et pour lesquels la photo ne permet pas de distinguer si l'éclairage artificiel est enclenché).



Figure 4 : L'analyse détaillée de cette photo permet d'observer que l'éclairage artificiel est enclenché dans au moins 15 locaux dont les stores ne sont pas en position relevée.

Enfin, une dernière analyse de cette image nous informe que lorsque les stores sont partiellement abaissés, les utilisateurs n'ont pas pour autant allumé les lampes (Figure 5).

Il est fort probable que si la commande de l'éclairage avait été automatisée, l'ordre d'enclenchement aurait été donné pour une partie d'entre eux.

On verra au **chapitre 4.3, page 30 et suivantes**, que les seuils d'enclenchement de l'éclairage artificiel par les utilisateurs n'est pas corrélée aux valeurs standard de l'éclairement requis à l'intérieur des locaux.

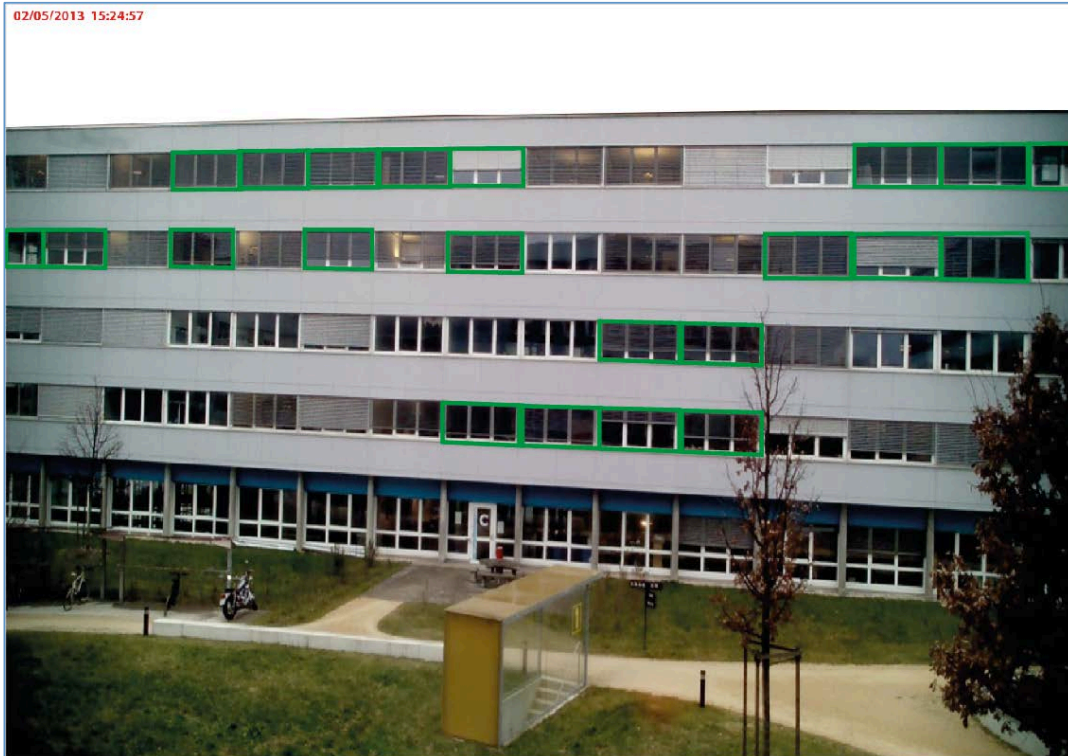


Figure 5 : L'analyse de cette photo montre que pour au moins 22 ouvertures dont les stores sont partiellement fermés, l'éclairage artificiel n'est apparemment pas enclenché.

3 Procédure / méthodologie

3.1 Bâtiments observés

Les quatre bâtiments observés sont tous situés sur le site de l'EPFL Innovation Park, à l'extrémité Sud-Ouest du campus de l'EPFL, sur la commune d'Ecublens (cf. Figure 6 ci-dessous). Ces bâtiments abritent des bureaux occupés par des start-up de l'EPFL. La Figure 7 indique l'emplacement des webcams (une par orientation) et les 4 figures suivantes montrent les façades concernées.



Figure 6: Plan de situation, campus de l'EPFL et EPFL Innovation Park (cercle rouge).

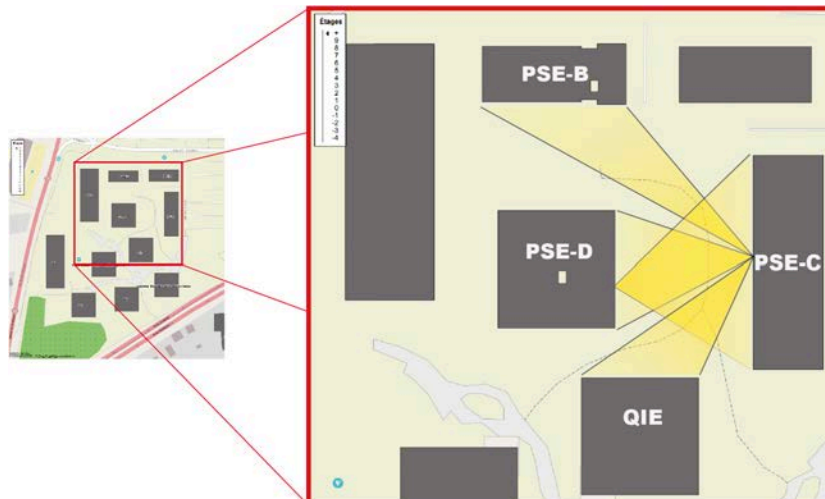


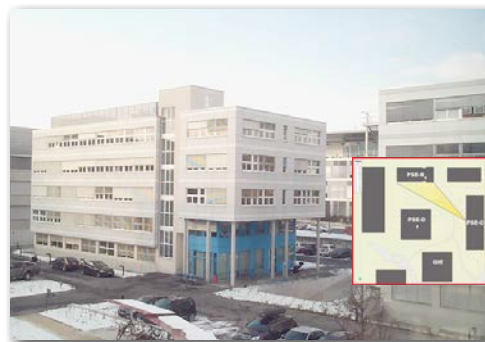
Figure 7: Schéma d'implantation des webcams.

*Figure 8: Façade orientée au Sud,
Bâtiment PSE-B*

Cette façade est équipée de store à lames avec une commande manuelle (manivelle).

Elle comporte au total 40 groupes de stores.

Elle est observée depuis le bâtiment PSE-C



*Figure 9 : Façade orientée à l'Est
Bâtiment PSE-D*

Cette façade est équipée de stores à lames motorisés (commande par interrupteur à proximité des fenêtres).

Elle comporte au total 27 groupes de stores.

Elle est observée depuis le bâtiment PSE-C

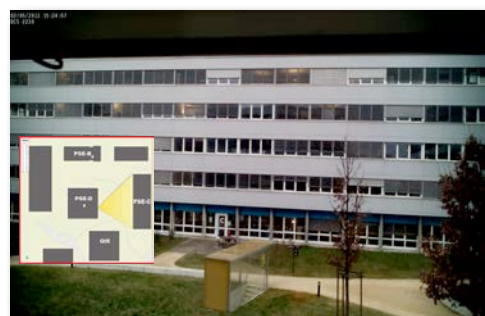


*Figure 10 : Façade Orientée à l'Ouest
Bâtiment PSE-C*

Cette façade est équipée de store à lames avec une commande manuelle (manivelles).

Elle comporte au total 58 groupes de stores.

Elle est observée depuis le bâtiment PSE-D



*Figure 11 : Façade orientée au Nord,
Bâtiment QI-E*

Cette façade a fait l'objet de la même observation que les autres façades. Cependant, compte-tenu du faible nombre de mouvements et de l'ensoleillement très réduit, nous n'avons, à ce jour, pas exploité les données de mouvement de stores.

Elle est observée depuis le bâtiment PSE-C



3.2 Matériel d'observation

L'observation de la position des stores est réalisée au moyen de 4 webcams full-HD (1920 x 1080, modèle D-Link DCS-2210) disposées comme indiqué sur la Figure 7.

Les données sont sauvegardées toutes les heures sur un serveur et les photos sont traitées de façon semi-automatisée.

3.3 Observations

A chaque heure, nous observons le pourcentage de fermeture (« Covered area », de 0 à 100% par paliers de 25%) comme le montre schématiquement la Figure 12 ci-après.

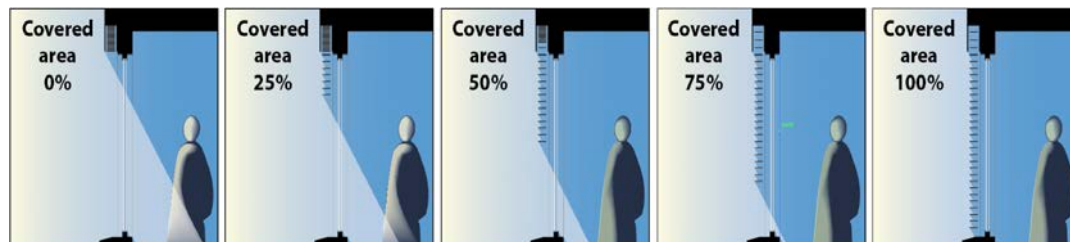


Figure 12: Représentation schématique du pourcentage de fermeture des stores.

De plus, nous repérons aussi à chaque pas de temps, l'angle d'inclinaison des lames. Pour simplifier l'analyse, nous avons déterminé 3 classes d'inclinaison comme le montre la Figure 13 ci-après.

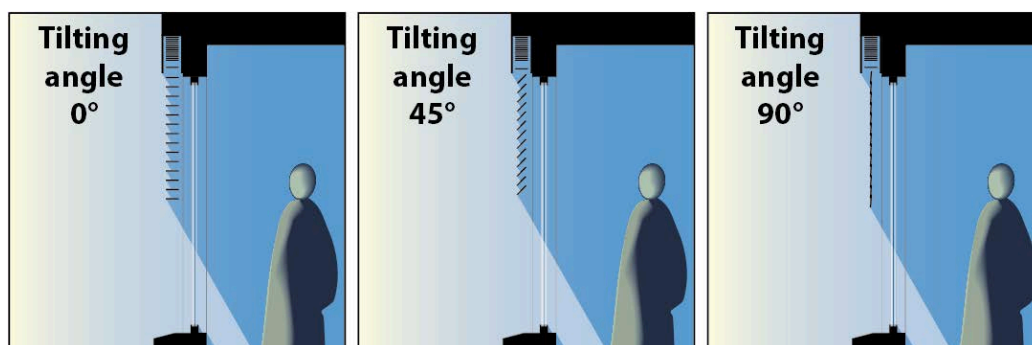


Figure 13: Représentation schématique des trois classe d'inclinaison des lames.

3.4 Période d'observation

Les caméras ont été opérationnelles à partir du 1^{er} février 2013. La période d'analyse couvre donc 12 mois consécutifs entre le 1^{er} février 2013 et le 31 janvier 2014.

Caractéristiques climatiques de la période

Pour rendre compte des caractéristiques climatiques de la période d'analyse, nous citons ci-après des extraits du « *Bulletin climatologique année 2013* », de MétéoSuisse [1]

[...] Au niveau national, les températures moyennes de l'année météorologique 2013 ont été conformes à la norme 1981-2010. Les précipitations annuelles ont été légèrement supérieures à la norme [...].

[...] L'année 2013 a été caractérisée par des conditions hivernales qui ont persisté jusqu'à la fin du mois d'avril et par un **record négatif d'ensoleillement entre janvier et mai** [...].

[...] Un été extrêmement ensoleillé a permis de rattraper l'important déficit d'ensoleillement accumulé depuis le début de l'année.

La Figure 14 et la Figure 15 ci-après montrent que l'ensoleillement des mois d'avril et mai a été nettement inférieur à la moyenne. On note en particulier, que l'ensoleillement du mois de mai représente entre 50 et 65% de la valeur moyenne annuelle (Figure 15). Ce constat sera utile pour interpréter les résultats obtenus concernant les mouvements et la position des stores.

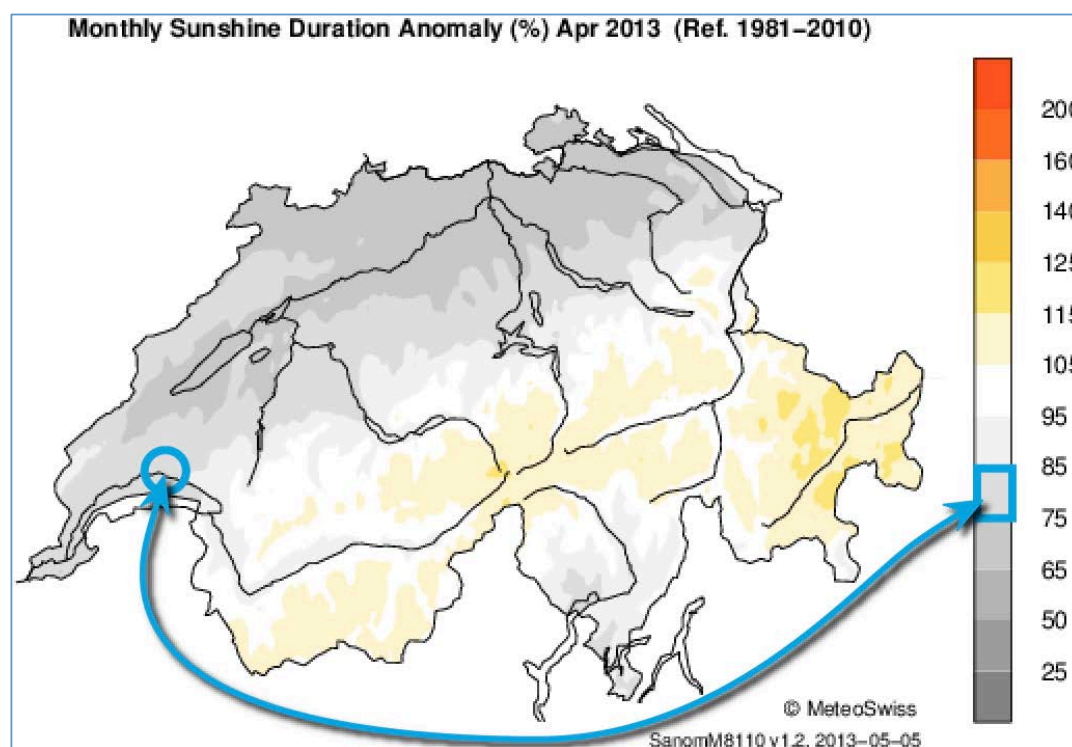


Figure 14: l'ensoleillement au mois d'avril a été inférieur à la moyenne (75-85%)

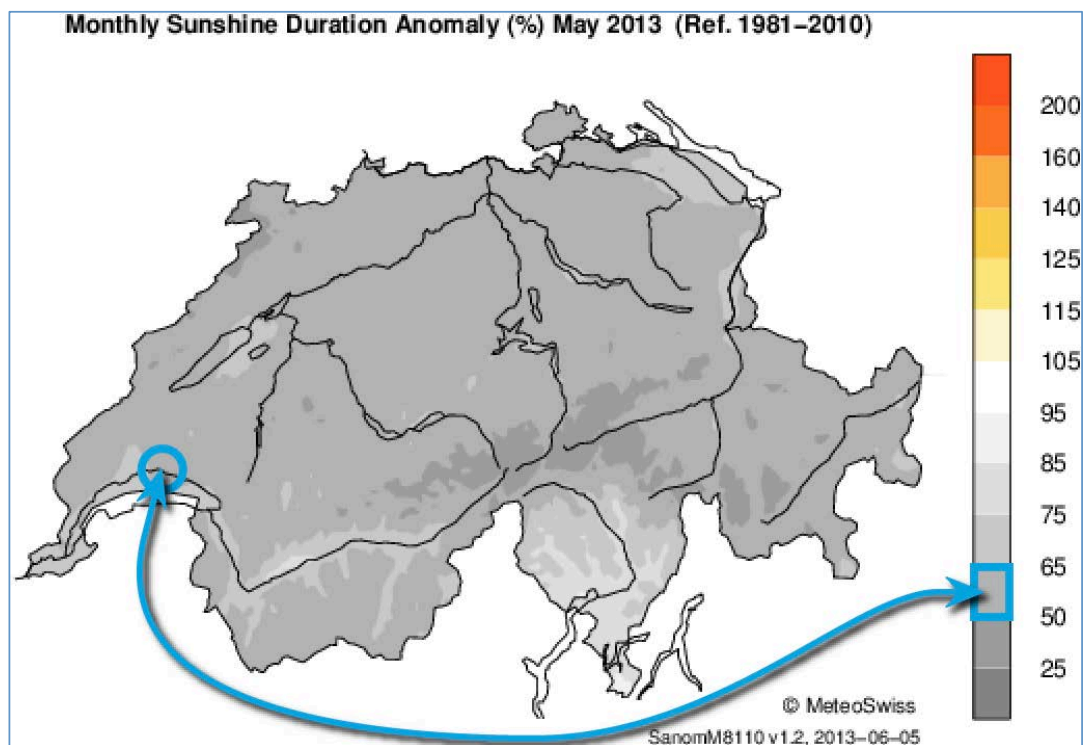


Figure 15 : Au mois de mai l'ensoleillement a été **nettement** inférieur à la moyenne (50-65%)

En complément de ces informations sur les caractéristiques climatiques de la période d'analyse (1^{er} février 2013 - 31 janvier 2014), l'observation des données climatiques de Pully sur cette même période fait apparaître une nette dissymétrie entre le rayonnement moyen disponible le matin et l'après-midi (cf. Tableau 1). On en déduit qu'en moyenne, l'ensoleillement a été globalement plus réduit le matin que l'après-midi.

	Matin	Après-midi
Rayonnement direct normal	139 W/m ²	198 W/m ²
Rayonnement diffus horizontal	98 W/m ²	127 W/m ²

Tableau 1: Rayonnement mesuré pour la station météo de Pully durant la période d'observation des bâtiments (01-02-2013 / 31-01-2014).

4 Résultats / enseignements

4.1 Mouvement des stores

4.1.1 Mouvements détectés

Lorsqu'un changement de position du store vers le haut ou vers le bas est détecté, cela est comptabilisé comme un mouvement. Si ce changement est accompagné d'une modification de l'inclinaison des lames, cette modification n'est alors pas considérée comme un mouvement supplémentaire. En revanche, lorsque seule l'inclinaison des lames est détectée, cela est compté comme un mouvement à part entière.

4.1.1.1 Distribution annuelle des mouvements

Le Tableau 2 ci-dessous récapitule l'ensemble des mouvements de stores détectés durant les 365 jours d'observation des bâtiments. Les cases grisées correspondent aux nombres de mouvements par fenêtre (total des mouvements observés divisé par nombre de fenêtres spécifique à chaque façade).

Compte tenu du fait que le relevé des positions a été effectué toutes les heures, il est vraisemblable que quelques mouvements aient échappé à ce décompte. Cependant, la probabilité qu'un utilisateur ait modifié la position du store une première fois, puis ait repositionné celui-ci de façon identique entre deux relevés successifs reste très faible. Nous considérons donc que ces chiffres sont tout à fait significatifs des mouvements observés.

	Façade Est		Façade Sud		Façade Ouest	
Nombre de stores observés	27		40		58	
Nombre de mouvements vers le HAUT	990	36.7	1115	27.9	1189	20.5
Nombre de mouvements vers le BAS	1062	39.3	1226	30.7	1421	24.5
Nombre de mouvements d'INCLINAISON seule	365	13.5	697	17.4	3505	60.4
Nombre total de mouvements	2417	89.5	3038	76.0	6115	105.4
Nombre moyen de mouvements par SEMAINE	48.5	1.72	58.4	1.46	117.6	2.03
Moyenne globale pondérée par semaine	1.74					

Tableau 2 : Récapitulatif des mouvements de stores détectés sur les 3 façades exposées aux rayonnements solaires pendant les heures de bureau. (Est, Sud et Ouest ; les cases grisées correspondent aux nombres de mouvements par fenêtre).

Le Tableau 3 montre, pour chaque façade, la fréquence des mouvements. On constate que la tendance est similaire quelle que soit l'orientation considérée, avec un paroxysme pour la façade Sud, où plus de la moitié des occupants utilisent leur store moins d'une fois par semaine.

Avec seulement 12% des occupants qui utilisent leur stores une fois par jour (> 4 mouvements par semaine), force est donc de constater que les utilisateurs sont de très mauvais gestionnaires de leur propre protection solaire.

Façade	Fréquence de mouvement				
	≤ 1 mouvement par semaine	≤ 2 mouvements par semaine	≤ 3 mouvements par semaine	≤ 4 mouvements par semaine	> 4 mouvements par semaine
Est	37%	33%	15%	4%	11%
Sud	53%	23%	12%	5%	7%
Ouest	36%	26%	19%	3%	16%
Moyenne	41%	26%	16%	4%	12%

Tableau 3 : Fréquence moyenne des mouvements de stores en fonction de l'orientation de la façade (y-compris les mouvements d'inclinaison seuls).

Orientation Sud (stores manuels)

Comme exposé ci-dessus, pour la façade sud, le nombre total de mouvements détectés sur les 12 mois d'analyse est de 3038, pour les 40 groupes de stores (y compris les changements d'inclinaison seuls).

Ceci correspond, en moyenne, à **1.46 mouvements par semaine et par store**, ce qui est très faible.

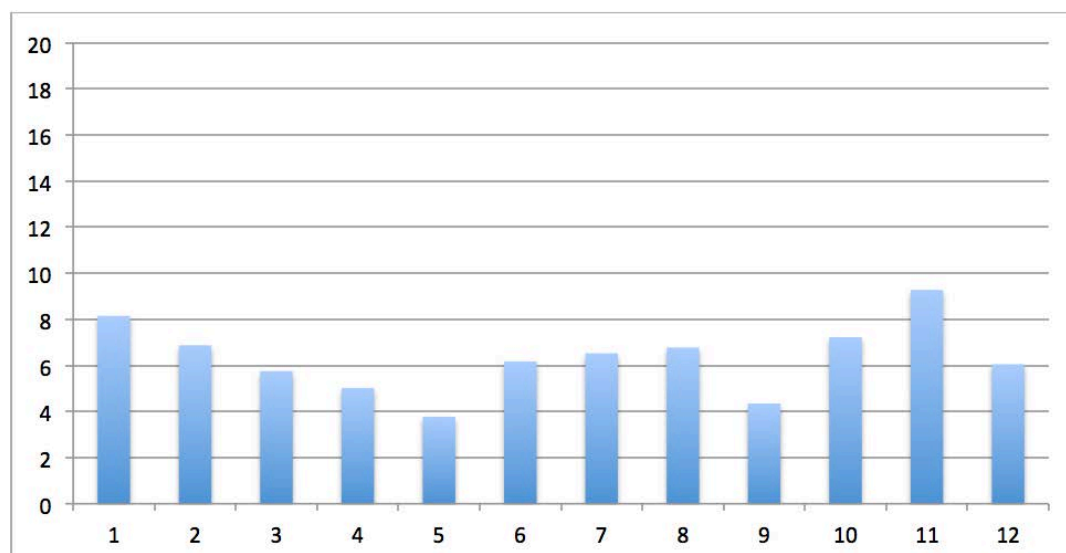


Figure 16: Distribution mensuelle de la moyenne des mouvements de stores sur la façade Sud (bâtiment PSE-B).

La Figure 16 montre comment se répartissent ces mouvements au cours de l'année.

Pour chaque mois, est affiché le nombre moyen de mouvements par store. On constate que ce nombre est très réduit (minimum : 3.8 mouvements par mois en mai et maximum, 9.3 mouvement par mois en novembre).

La distribution des mouvements au cours de l'année est relativement homogène, avec toutefois un léger creux en mai, en septembre et en décembre.

- Pour le mois de mai, les conditions climatiques particulières énoncées plus haut (cf. Figure 15) sont probablement en cause.
- Pour le mois de décembre, les congés de fin d'année expliquent sans doute le faible nombre de mouvements.
- En ce qui concerne le mois de septembre, nous n'avons pas d'explication rationnelle à avancer pour expliquer la chute du nombre de mouvements.

Orientation Est (stores motorisés)

Pour la façade Est, le nombre total de mouvements détectés sur les 12 mois d'analyse est de 2417, pour les 27 groupes de stores (y compris les changements d'inclinaison seuls).

Ceci correspond, en moyenne, à **1.72 mouvements par semaine et par store** en moyenne, ce qui, de nouveau, est très faible.

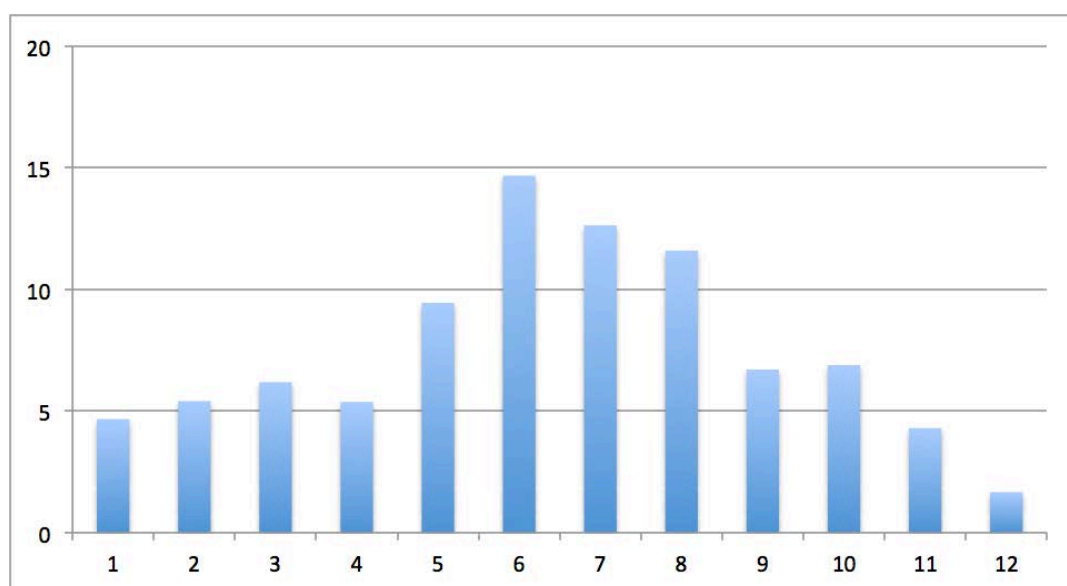


Figure 17: Distribution mensuelle des mouvements de stores sur la façade Est (Bât. PSE-D).

La Figure 17 montre comment se répartissent les mouvements de stores au cours de l'année sur la façade orientée à l'Est. On constate une forte disparité du nombre moyen de mouvements en fonction du mois considéré (minimum : 1.7 mouvements par mois en décembre et maximum, 14.7 mouvements par mois en juin). Ceci traduit une disparité importante entre l'hiver et l'été. Le nombre maximum de mouvements se situe durant les mois de juin, juillet et août.

Orientation Ouest (stores manuels)

Pour la façade ouest, le nombre total de mouvements détectés sur les 12 mois d'analyse est de 6115, pour les 58 groupes de stores (y-compris les changements d'inclinaison seuls).

Ceci correspond en moyenne, à **2.03 mouvements par semaine et par store** en moyenne.

Ce chiffre est légèrement plus élevé que pour les autres façades. On a vu précédemment (cf. Tableau 2) que pour la façade Ouest, une grande partie des mouvements correspond à des modifications de l'inclinaison des lames.

La Figure 18 montre comment se répartissent les mouvements de stores au cours de l'année sur la façade orientée à l'Ouest. On constate une forte disparité du nombre moyen de mouvements en fonction du mois considéré (minimum 3.2 mouvements par mois et par fenêtre en décembre et maximum, 14 mouvements par mois en juin). Ici, comme sur la façade Est, la distribution des mouvements au cours de l'année traduit une disparité importante entre la saison de chauffage et l'été. Le nombre maximum de mouvements se situe durant les mois de juin, juillet et août.

Le faible nombre de mouvements observés en avril et en mai s'explique sans doute par le faible ensoleillement mentionné plus haut (cf. Figure 14 et Figure 15).

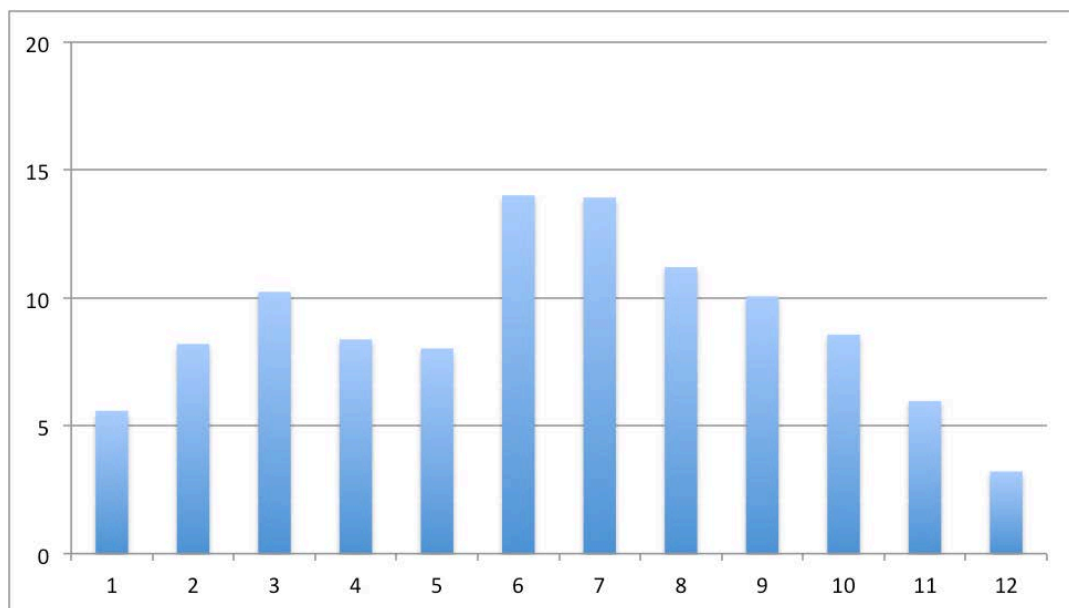


Figure 18 : Distribution mensuelle des mouvements de stores sur la façade Ouest (Bât. PSE C).

4.1.2 Distribution journalière des mouvements

4.1.2.1 Orientation Sud (stores manuels)

La Figure 19 ci-après montre que les mouvements consistant à relever les stores ont surtout lieu le matin, avant 11 h et en fin d'après-midi, vers 17h. On imagine que les occupants arrivant le matin ressentent le besoin d'ouvrir les stores qui ont été baissés la veille.

Les mouvements consistant à baisser les stores ont lieu dans le cœur de la journée, avec un pic à 14h, à la reprise du travail après la pause déjeuner.

Les mouvements d'inclinaison, qui sont quant à eux moins nombreux, se répartissent tout au long de la journée.

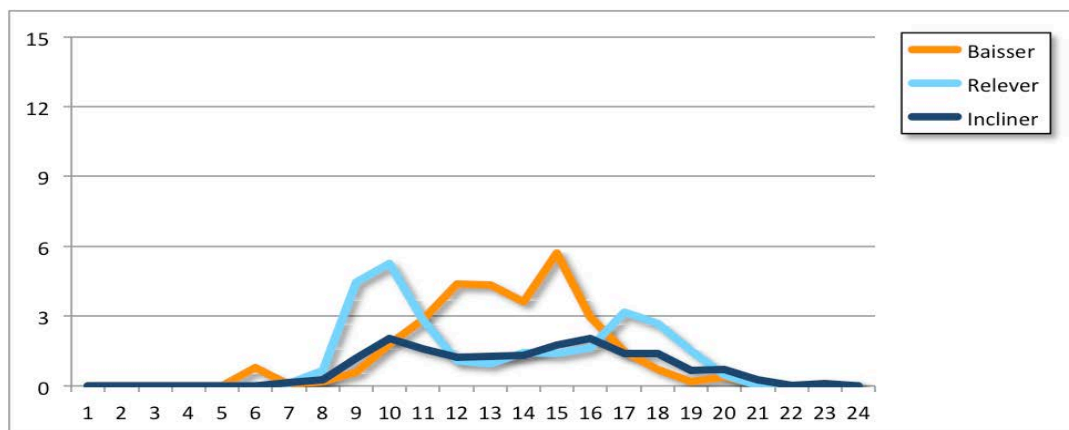


Figure 19 : Distribution journalière des mouvements de stores pour les ouvertures orientées au Sud (Bâtiment PSE-B).

4.1.2.2 Orientation Est (stores motorisés)

La Figure 20 ci-après montre que les mouvements consistant à baisser les stores ont lieu presque exclusivement le matin. Ceci est cohérent avec le fait que cette façade est exposée aux rayons solaires uniquement le matin.

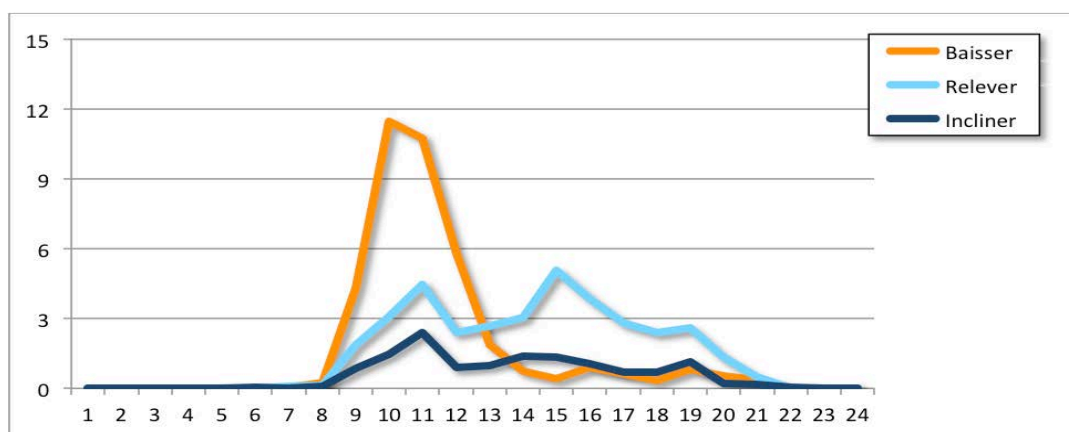


Figure 20 : Distribution journalière des mouvements de stores pour l'orientation à l'Est.

Les mouvements consistant à relever les stores sont, quant à eux, répartis tout le long de la journée de travail, avec un creux pendant la pause de midi. Dans la mesure où cette façade ne recevra pas de soleil durant l'après-midi, la logique voudrait que les utilisateurs relèvent les

stores en revenant à leur bureau après le déjeuner. Les observations montrent que cette pratique n'est pas dominante. Les mouvements d'inclinaison se répartissent tout au long de la journée.

4.1.2.3 Orientation Ouest (stores manuels)

La Figure 21 ci-après montre que les mouvements consistant à relever les stores ont lieu plutôt le matin. Ceci est cohérent avec le fait que la façade Ouest n'est pas exposée aux rayons solaires le matin.

Les mouvements consistant à baisser les stores sont, quant à eux, concentrés l'après-midi, ce qui correspond à l'irruption du soleil sur cette façade.

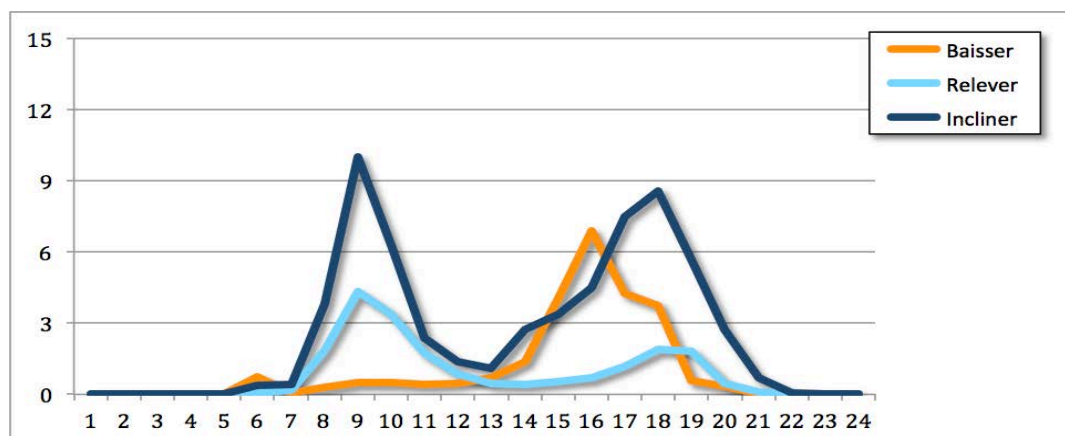


Figure 21 : Distribution journalière des mouvements de stores pour l'orientation Ouest

Les mouvements d'inclinaison, quant à eux, sont nettement plus nombreux que sur les autres façades. On constate un pic le matin entre 8h et 9h. Ceci correspond sans doute à un ajustement consistant à mettre les lames à l'horizontal afin de faciliter la vision vers l'extérieur. En revanche, les mouvements d'inclinaison de l'après-midi sont destinés à ajuster le blocage des rayons solaires au fur et à mesure de la baisse de la hauteur du soleil dans le ciel. On peut raisonnablement penser que les mouvements d'inclinaison remplacent des mouvements de relevage et d'abaissement des stores.

4.1.3 Pourcentage d'occultation

Au delà de ce constat sur les mouvements de stores, on notera que la fraction moyenne d'occultation des fenêtres est très élevée.

- La Figure 22 montre par exemple que pour la façade Sud, l'ouverture est, en moyenne, au trois quart (74%) occultée par les stores (Cette représentation ne rend pas compte de l'inclinaison éventuelle des lames).
- La façade Ouest est un peu moins impactée (56%), mais c'est quand même plus de la moitié de la surface vitrée qui est masquée par les stores.
- C'est finalement la façade Est, qui est la moins pénalisée (35%) et qui présente la fraction moyenne de vitrage « actif » la plus élevée.










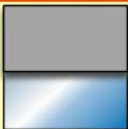
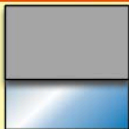
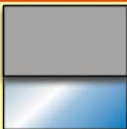
Façades	Hiver	Eté	Total
Est (motorisé)	22% 	48% 	35% 
Sud (manuel)	69% 	78% 	74% 
Ouest (manuel)	58% 	55% 	56% 
Moyenne pondérée	53% 	60% 	57% 

Figure 22 : Fraction moyenne d'occultation des ouvertures en fonction de l'orientation de la façade (occultation moyenne).

En définitive, cette observation pourrait nous conduire à considérer que, sur l'ensemble des façades observées, la « **hauteur effective** » de l'ouverture ne représente que $(100-57) = 43\%$ de sa hauteur réelle.

Cette interprétation est sans doute exagérée, dans la mesure où la partie supérieure du vitrage n'est pas totalement inactive (fonction de l'inclinaison des lames), mais elle permet de marquer les esprits. Elle sera évaluée plus loin dans le document, cf. § 4.7.11, page 65.

4.1.4 Synthèse des observations sur les mouvements de stores

Les informations présentées dans ce chapitre nous permettent d'établir les constatations suivantes :

- Le nombre de mouvements vers le bas ou vers le haut est nettement plus élevé sur la façade Est. Ceci s'explique sans doute partiellement par le fait que les stores sont motorisés sur cette façade, ce qui facilite leur utilisation.
- Le nombre de mouvements d'inclinaison seule est 4 fois plus élevé sur la façade Ouest que sur les autres façades. Le soleil étant en phase descendante lorsqu'il frappe la façade Ouest, des réglages successifs de l'inclinaison des lames sont nécessaires pour bloquer le direct, notamment en fin de journée.
- La façade Sud est celle qui présente le plus faible nombre de mouvements. Ceci s'explique par le fait que, durant une bonne partie de l'été (dès que la hauteur solaire dépasse 40°, **cf. Figure 31, page 35**), la position « *Stores baissés avec lames horizontales* » permet de bloquer le direct pendant toute la journée.
- Le nombre global de mouvements est extrêmement réduit (1.74 mouvements par semaine et par fenêtre en moyenne). Le potentiel des stores est largement sous-utilisé.
- Le pourcentage effectif d'occultation des ouvertures est très important (57%) ce qui se traduit par une *hauteur active* de vitrage très réduite par rapport au potentiel initial (43% de la hauteur réelle de l'ouverture).

4.2 Contribution à l'éclairage naturel des locaux

Afin d'évaluer la contribution effective de la lumière du jour dans les locaux observés, nous avons simulé, heure par heure et sur toute la période d'observation, la quantité de lumière naturelle disponible dans chacun des locaux, en tenant compte de la position du store et des conditions climatiques correspondantes (données climatiques de la station MétéoSuisse de Pully).

Les simulations ont été réalisées avec une version avancée du logiciel DIAL+Lighting (moteur de calcul Radiance) sur 5 points situés à une hauteur de 0.75 m du niveau du sol, comme le montre la Figure 23 ci-dessous.

La géométrie des lames a été simplifiée (lames planes et photométrie diffuse avec un facteur de réflexion mesuré de 0.3) de façon à contenir le temps de simulation dans des limites raisonnables. De ce fait, les résultats en valeur absolue sont sans doute légèrement sous-estimés, mais la comparaison entre les différentes configurations testées reste tout à fait pertinente.

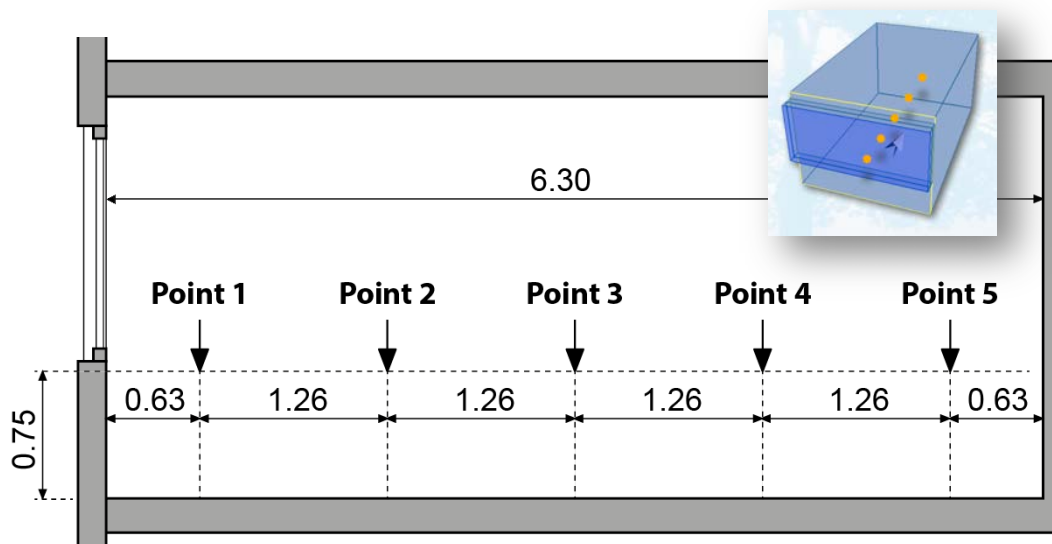


Figure 23 : Position des points de référence utilisés pour les simulations de lumière du jour.

Dans les graphiques présentés ci-après, les valeurs expriment la portion (%) du temps pendant laquelle l'éclairement au point considéré est supérieur ou égal à 500 lux (Auto₅₀₀, autonomie en éclairage naturel, tranche horaire 7h-18h). Afin de simplifier la lecture nous utiliserons, dans la suite du document, la terminologie suivante :

- Auto₁₅₀ = Pourcentage du temps pendant lequel l'éclairement est supérieur à 150 lux.
- Auto₅₀₀ = Pourcentage du temps pendant lequel l'éclairement est supérieur à 500 lux.

4.2.1 Résultats Façade Sud

La Figure 24 ci-dessous montre la contribution des ouvertures à l'éclairage des locaux donnant sur la façade Sud.

Chaque courbe représente un des 40 locaux de cette façade. Le Point 1 (à gauche sur le graphe) est le point le plus proche de la façade vitrée et le Point 5 est le plus éloigné. De façon naturelle, la couverture des besoins est importante près de la façade et se réduit au fur et à mesure que l'on se rapproche du fond du local.

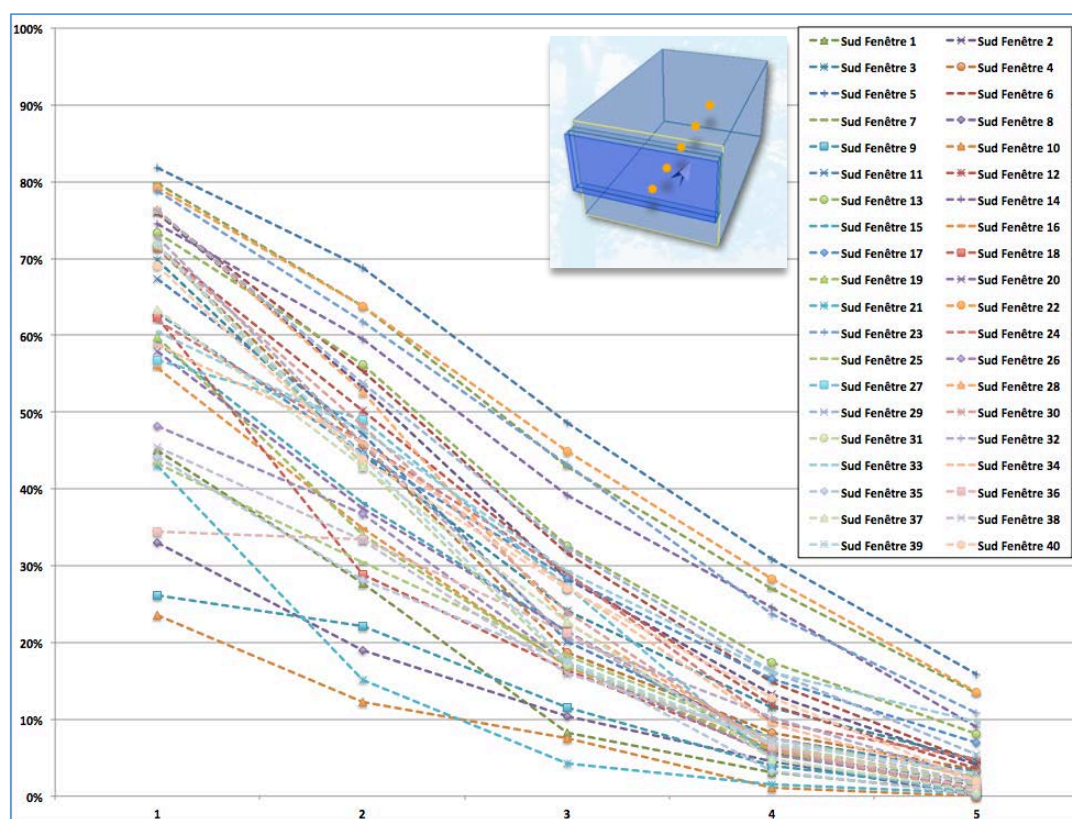


Figure 24 : FACADE SUD, Pourcentage du temps (7h-18h) pendant lequel la lumière naturelle permet d'atteindre ou de dépasser 500 lux pour chacun des points des 40 locaux étudiés sur la façade Sud (Auto₅₀₀). Le Point 1 correspond au point le plus proche de la fenêtre, le Point 5 correspond au point le plus éloigné de la façade.

Les courbes qui figurent dans la partie haute du graphe correspondent aux ouvertures dont les stores ne sont quasiment jamais fermés.

Le local qui présente la couverture des besoins la plus élevée est le local « Sud Fenêtre 5 » dont les stores sont restés ouverts pendant toute l'année (aucun mouvement). Du point de vue quantitatif, ce local représente la contribution maximale possible.

Pour celui-ci, nous avons les résultats suivants :

- A proximité immédiate de la façade (Point 1) : **Auto₅₀₀ = 75%**
- Au fond du local (Point 5) : **Auto₅₀₀ = 13%.**

Les courbes situées dans la partie basse du graphe correspondent à des ouvertures dont les stores sont baissés pendant la plupart du temps. Pour ces locaux, le nombre d'heures pendant lequel l'éclairage artificiel est enclenché est théoriquement très important.

Le local qui présente la moins bonne performance globale est le local « Sud Fenêtre 10 » dont les stores ont été fermé à 91% en moyenne (18 mouvements sur l'année y-compris mouvements d'inclinaisons, soit 437h entre deux mouvements).

Pour celui-ci, nous avons les résultats suivants :

- A proximité immédiate de la façade (Point 1), **Auto₅₀₀ = 26%**
- Au fond du local (Point 5) **Auto₅₀₀ = 0%**

4.2.2 Résultats Façade Est

La Figure 25 ci-après montre que la dispersion des résultats obtenus est moins importante pour les locaux de la façade Est, que dans le cas de la façade Sud.

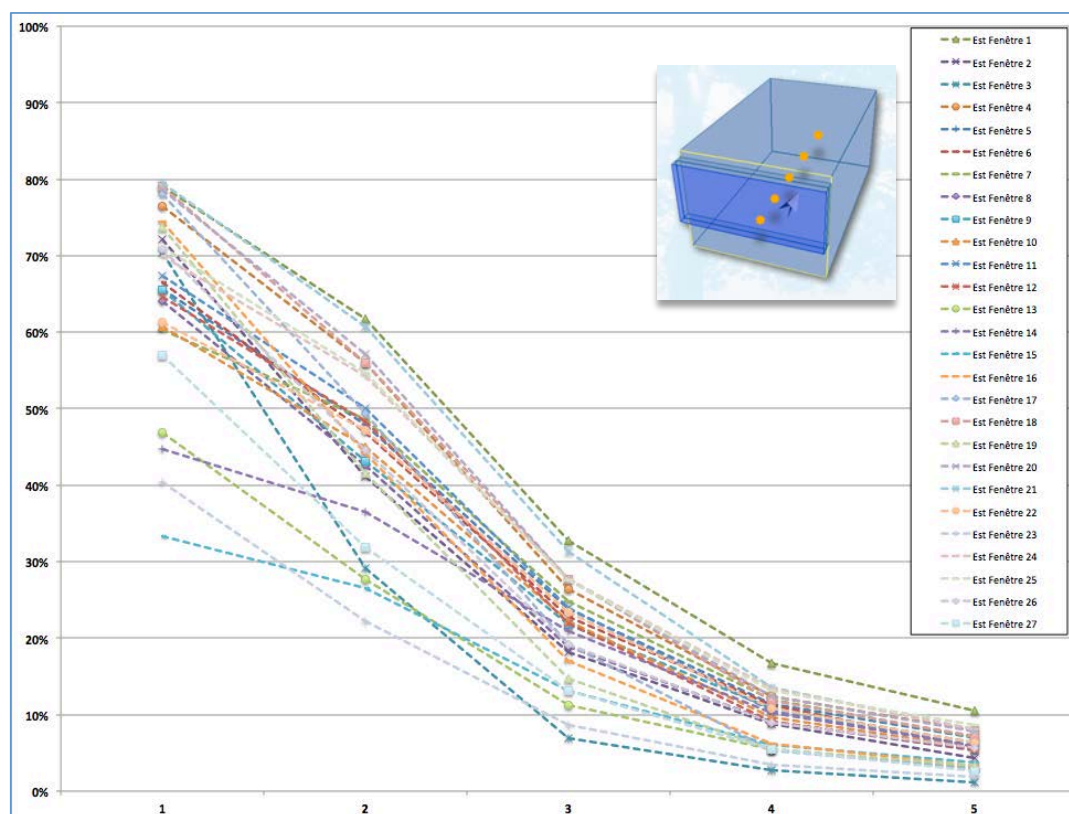


Figure 25 : FACADE EST, Pourcentage du temps (7h-18h) pendant lequel la lumière naturelle permet d'atteindre ou de dépasser 500 lux pour chacun des points des 27 locaux étudiés sur la façade Est (Auto₅₀₀).

Le local qui présente la couverture des besoins la plus élevée est le local « Est Fenêtre 1 »

Pour celui-ci, nous avons les résultats suivants :

- A proximité immédiate de la façade (Point 1) : **Auto₅₀₀ = 79%**
- Au fond du local (Point 5) : **Auto₅₀₀ = 11%.**

Le local qui présente la moins bonne performance globale est le local « Est fenêtre 23 » :

- A proximité immédiate de la façade (Point 1), **Auto₅₀₀ = 40%**
- Au fond du local (Point 5) **Auto₅₀₀ = 3%**

4.2.3 Résultats Façade Ouest

La Figure 26 ci-après montre, de nouveau, une dispersion très importante de la contribution lumineuse en fonction des différents locaux observés.

Le local « Ouest fenêtre 37 », est celui qui présente la couverture des besoins la plus élevée (Auto₅₀₀ comprise entre 7 et 81%). Il correspond à un bureau dont les stores sont relevés en permanence (covered area = 0.1 %).

Le local « Ouest fenêtre 2 », est celui qui présente la couverture des besoins la plus faible (Auto₅₀₀ comprise entre 0 et 13%), y compris à proximité immédiate de la fenêtre. Il correspond à un bureau dont les stores sont fermés à 94.4% (covered area) en moyenne.

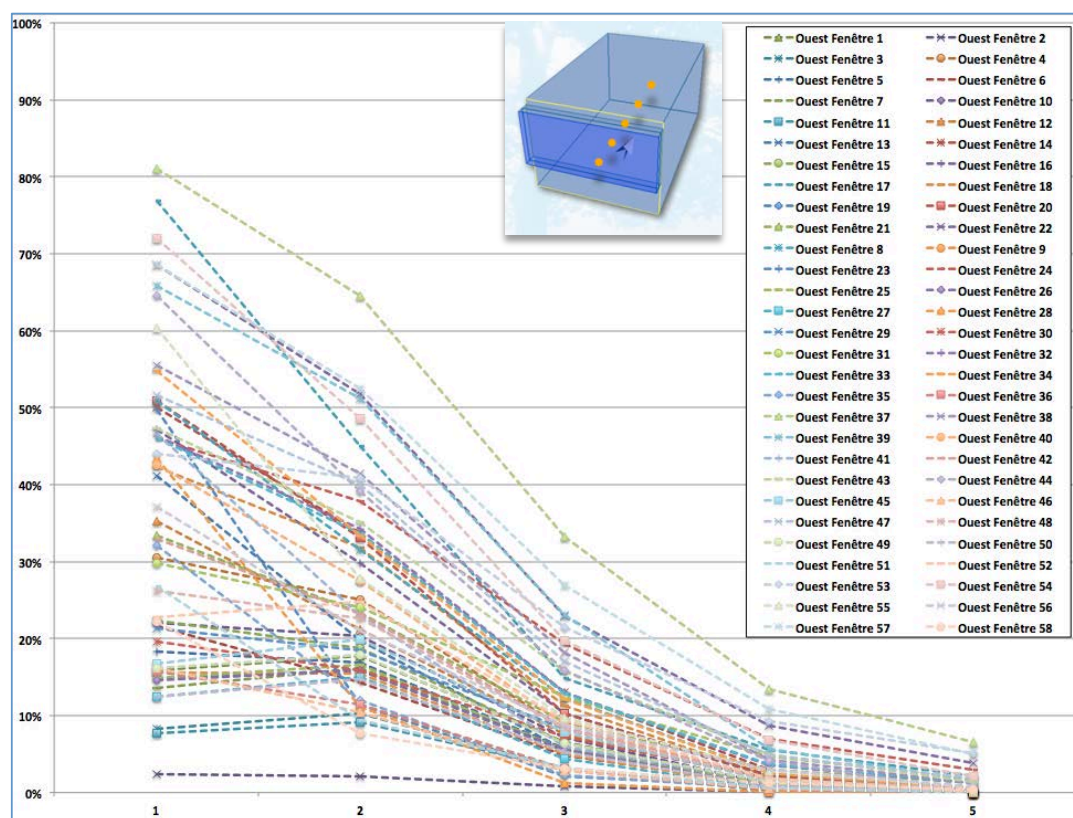


Figure 26 : FACADE OUEST, Pourcentage du temps (7h-18h) pendant lequel la lumière naturelle permet d'atteindre ou de dépasser 500 lux pour chacun des points des 8 locaux étudiés sur la façade Ouest (Auto₅₀₀).

4.2.4 Synthèse sur la contribution à l'éclairage des locaux

Les résultats des simulations présentées dans ce chapitre nous permettent d'établir les constatations suivantes :

- Pour un même local, l'usage qui est fait des stores est totalement imprévisible et conduit à une variation considérable de la contribution effective de la lumière du jour. Les écarts d'autonomie qui en découlent sont très élevés.
- A titre indicatif, les fourchettes d'autonomie ($Auto_{500}$) varient entre :
 - entre 3 et 82% près de la fenêtre (point 1).
 - entre 1 et 48% au centre du local (point 3).
 - entre 0 et 16% au fond du local (point 5).
- Quelle que soit la façade considérée, on constate qu'il y a des utilisateurs « *très permissifs* » dont les stores sont le plus souvent relevés et des utilisateurs « *très protectionnistes* » dont les stores sont presque tout le temps baissés et fermés.
- La façade Ouest présente des disparités extrêmes entre les différents utilisateurs tandis que la façade Est présente la plus faible dispersion des résultats. La motorisation des stores sur cette dernière façade semble induire une meilleure utilisation du potentiel de lumière du jour.

4.3 Observation de la gestion de l'éclairage artificiel par les utilisateurs

L'observation des photos prises pendant l'année de mesure, permet parfois de repérer le moment de l'enclenchement des lampes (ou, tout au moins de connaître la tranche horaire pendant laquelle l'allumage a été effectué). Nous avons effectué une analyse systématique des photos de la façade Ouest en fin de journée pour essayer d'en tirer une conclusion sur un éventuel seuil d'enclenchement, c'est à dire un niveau d'éclairement intérieur en dessous duquel les utilisateurs décident d'allumer les lampes.



Figure 27 : Images successives de la façade Ouest prises respectivement le 9 avril 2013 à 17h38 (en haut) et 18h38 (en bas). Sur ces 2 images il est possible de distinguer que l'éclairage artificiel a été enclenché dans 4 locaux au moins (encadrés en rouge).

A l'exemple des deux photos montrées sur la Figure 27, nous avons sélectionné plus de 100 couples d'images sur lesquelles il a été possible de détecter l'allumage d'un ou plusieurs locaux. On notera que le pas de temps entre deux relevés ne nous permet pas de connaître précisément le moment où a eu lieu l'enclenchement de l'éclairage artificiel. En effet, dans certain cas, il a pu se situer tout de suite après la prise de la première photo et dans d'autres, juste avant la deuxième.

Nous avons ensuite consulté, pour chacun de ces instants, quel était le niveau d'éclairement intérieur dans les locaux considérés, en tenant compte de la position des stores (sur la base des résultats des simulations Radiance). L'éclairement calculé après enclenchement concerne seulement la contribution de la lumière du jour, ce qui permet de connaître les bornes de l'intervalle pendant lequel l'utilisateur a jugé que l'éclairage naturel n'était pas suffisant pour accomplir les tâches qui lui incombait.

4.3.1 Analyse de la valeur de l'éclairement au centre du local

La Figure 28 montre sur un même graphe, l'ensemble des couples de valeurs de l'éclairement intérieur au centre des locaux, avant et après l'enclenchement des luminaires (respectivement E_{c1} en bleu et E_{c2} en jaune).

On constate que la chute de l'éclairement entre les deux situations, sur un pas de temps d'une heure de temps, est importante. En moyenne l'éclairement au centre du local a, en effet, été divisé par un facteur supérieur à 3 durant cet intervalle ($E_{c2}/E_{c1} = 0.28$). Dans la plupart des cas, cela correspond à la tombée du jour en fin de journée.

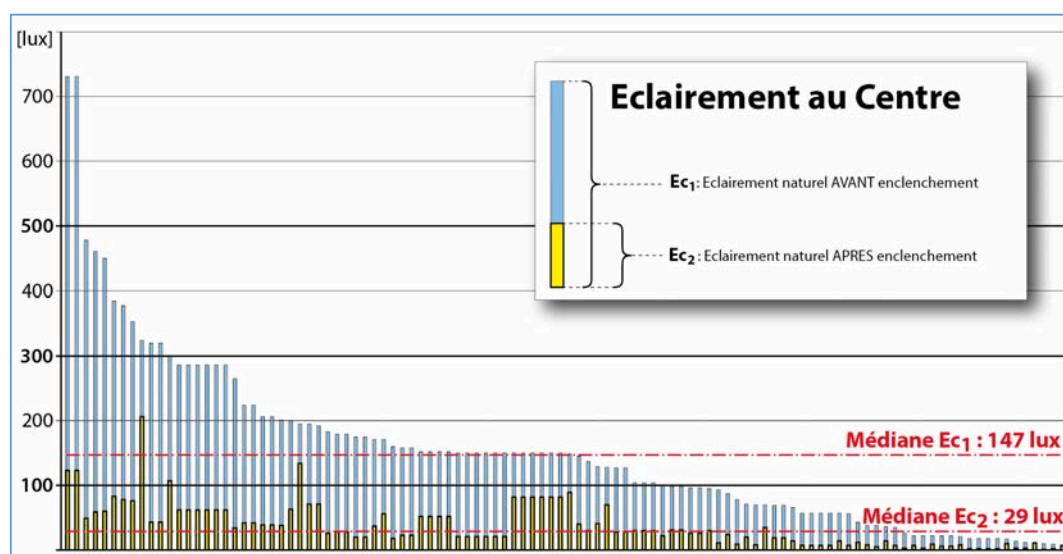


Figure 28 : Valeurs de l'éclairement au centre du local avant (E_{c1} en bleu) et après (E_{c2} en jaune) l'enclenchement de l'éclairage artificiel, pour chacune des occurrences que nous avons pu repérer sur la façade Ouest.

Le Tableau 4 montre que l'éclairement intérieur E_{c1} au centre des locaux était inférieur à 500 lux dans 98% des cas et inférieur à 300 lux dans 89% des cas. La valeur médiane de l'éclairement avant enclenchement, quant à elle, est égale à 147 lux.

Eclairage artificiel OFF (E_{c1})					
Répartition des locaux en fonction de la valeur de l'ECLAIREMENT AU CENTRE					
$E_{c1} < 500$ lux	$E_{c1} < 400$ lux	$E_{c1} < 300$ lux	$E_{c1} < 200$ lux	$E_{c1} < 147$ lux	$E_{c1} < 100$ lux
98%	95%	89%	78%	50%	41%

Tableau 4 : Analyse de la valeur de l'éclairage au centre des locaux étudiés avant l'allumage des lampes.

Le Tableau 5 montre que la contribution de la lumière du jour à l'éclairage intérieur E_{c2} au centre des locaux était inférieure à 200 lux dans 99% des cas et inférieure à 100 lux dans 95% des cas. La valeur médiane de l'éclairage après enclenchement, quant à elle, est égale à 29 lux.

Eclairage artificiel ON (E_{c2})					
Répartition des locaux en fonction de la valeur de l'ECLAIREMENT AU CENTRE					
$E_{c2} < 200$ lux	$E_{c2} < 150$ lux	$E_{c2} < 100$ lux	$E_{c2} < 50$ lux	$E_{c2} < 29$ lux	$E_{c2} < 25$ lux
99%	99%	95%	70%	50%	45%

Tableau 5 : Analyse des valeurs d'éclairage au centre des locaux étudiés, après enclenchement de l'éclairage artificiel (contribution de la lumière du jour seule).

4.3.2 Analyse de la valeur de l'éclairage moyen du local

Afin de confirmer ces résultats, nous avons reproduit l'analyse en examinant cette fois-ci la valeur moyenne de l'éclairage du local (E_m = moyenne des 5 points décrits précédemment, cf. Figure 23).

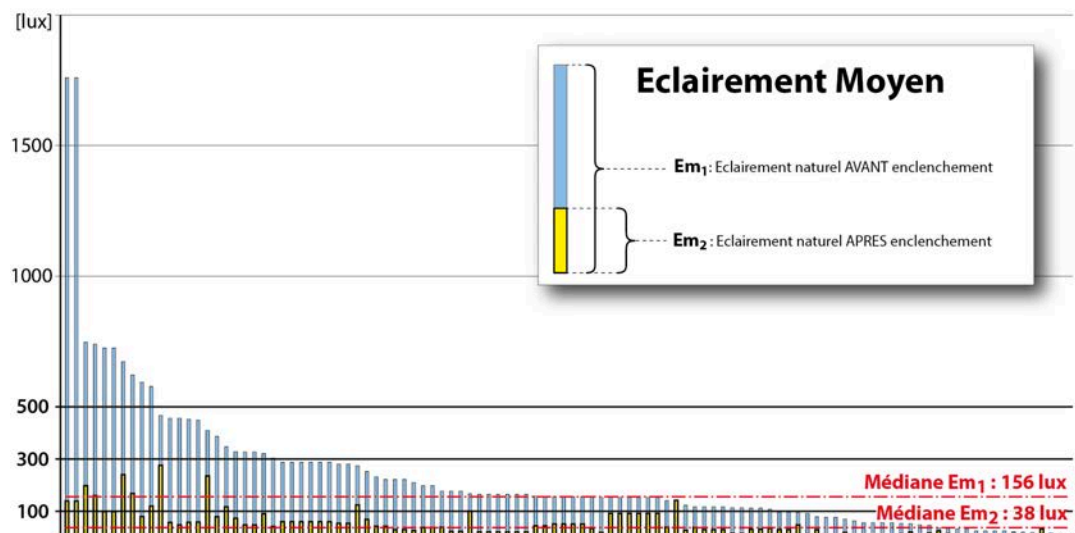


Figure 29 : Valeurs de l'éclairage moyen du local avant (E_{m1} en bleu) et après (E_{m2} en jaune) l'enclenchement de l'éclairage artificiel, pour chacune des occurrences que nous avons pu repérer sur la façade Ouest.

L'observation de la Figure 29 et des tableaux associés permet de constater que les seuils « médians » d'enclenchement de l'éclairage artificiel, bien que légèrement plus élevés que dans le cas précédent, sont relativement bas ($E_{m1} = 156$ lux et $E_{m2} = 38$ lux).

Eclairage artificiel OFF (Em_1)					
Répartition des locaux en fonction de la valeur de l'ECLAIREMENT MOYEN					
$Em_1 < 500$ lux	$Em_1 < 400$ lux	$Em_1 < 300$ lux	$Em_1 < 200$ lux	$Em_1 < 156$ lux	$Em_1 < 100$ lux
91%	85%	79%	65%	50%	30%

Tableau 6 : Analyse de la valeur de l'éclairage moyen (Em_1) des locaux étudiés avant l'allumage des lampes

Eclairage artificiel ON (Em_2)					
Répartition des locaux en fonction de la valeur de l'ECLAIREMENT MOYEN					
$Em_2 < 200$ lux	$Em_2 < 150$ lux	$Em_2 < 100$ lux	$Em_2 < 50$ lux	$Em_2 < 38$ lux	$Em_2 < 25$ lux
97%	94%	88%	62%	50%	34%

Tableau 7 : Analyse de la valeur de l'éclairage moyen (Em_2) des locaux étudiés avant l'allumage des lampes.

4.3.3 Synthèse sur l'enclenchement de l'éclairage artificiel

L'observation des seuils d'enclenchement de l'éclairage artificiel nous permet de dégager les constats suivants :

- La moitié des utilisateurs a ressenti le besoin d'allumer les lampes lorsque la valeur de l'éclairage au centre du local était comprise entre 29 et 147 lux, ce qui est très éloigné de la valeur d'éclairage requise par la norme (500 lux pour les bureaux). Le constat est similaire si l'on observe la valeur moyenne de l'éclairage du local.
- Les utilisateurs font preuve d'une grande tolérance quand au niveau d'éclairage dont ils disposent. Nous pensons que la concentration nécessaire à la réalisation des tâches quotidiennes est un facteur dominant et que, de surcroît, lorsque les utilisateurs travaillent sur écran, leur sensibilité à l'éclairage ambiant reste faible.
- En tout état de cause, en l'absence d'un automatisme sur la commande de l'éclairage artificiel, les seuils effectifs d'enclenchement de l'éclairage artificiel sont beaucoup plus bas (< 150 lux) que la valeur requise pour l'éclairage intérieur des bureaux (500 lux).
- Nous en déduisons que si la commande de l'éclairage artificiel est automatisée avec une valeur seuil de 500 lux, (valeur au centre ou valeur moyenne du local), alors le nombre d'heures d'enclenchement sera sans doute nettement supérieur à celui observé avec une commande manuelle.
- Ces constatations ne préjugent pas des effets bénéfiques de la lumière sur la santé des utilisateurs, mais reflètent un effet probable sur la consommation d'énergie.

4.4 Scénarios d'automatisation des stores

La seconde partie de l'étude porte sur la comparaison des résultats obtenus par les utilisateurs, avec les performances qui auraient été atteintes si les mouvements des protections solaires avaient été automatisés. Nous rappelons ici que cette étude ne porte pas sur l'optimisation des gains solaires (thermique), mais se concentre sur les aspects lumineux.

Le principe consiste à re-simuler, avec le logiciel **DIAL+Lighting**, pour chaque façade observée, la contribution de la lumière du jour obtenue, heure par heure et sur l'ensemble de la période, avec les deux types d'automatismes décrits ci-après.

Deux types d'automatismes sont examinés. Le premier propose un réglage « en continu » (ci-après désigné par « CONTINUOUS ») et le second propose un réglage « par reset » (ci-après désigné par « RESET »)

4.4.1 Scenario 1 « CONTINUOUS »

Chaque fois que le soleil est présent, les stores sont baissés de façon à assurer le confort visuel des utilisateurs.

4.4.1.1 Condition sur le RAYONNEMENT

A chaque pas de temps on considère le rayonnement sur la façade (une sonde par façade). Si celui-ci est supérieur à 200 W/m^2 , on considère alors que le temps est ensoleillé et que le soleil pénètre dans le local.

Position des stores

- En été, si le rayonnement incident est supérieur à 200 W/m^2 , le store est baissé à 75% (cf. Figure 30 **gauche**).
- En hiver, si le rayonnement incident est supérieur à 200 W/m^2 , le store est baissé à 100% (cf. Figure 30 **droite**).

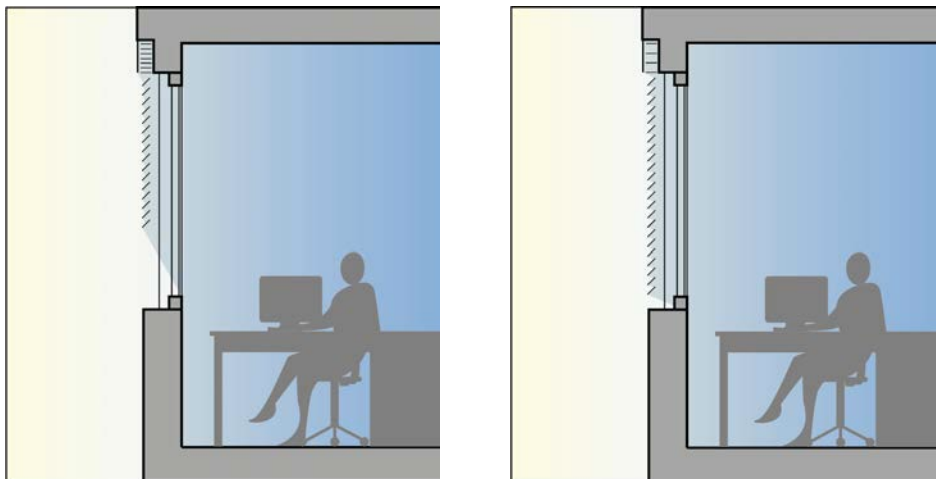


Figure 30: Gauche : stores baissés à 75% en été Droite : stores baissés à 100% en hiver.

Inclinaison des lames

L'inclinaison des lames est basée sur la hauteur du soleil à chaque pas de temps comme le montre la Figure 31.

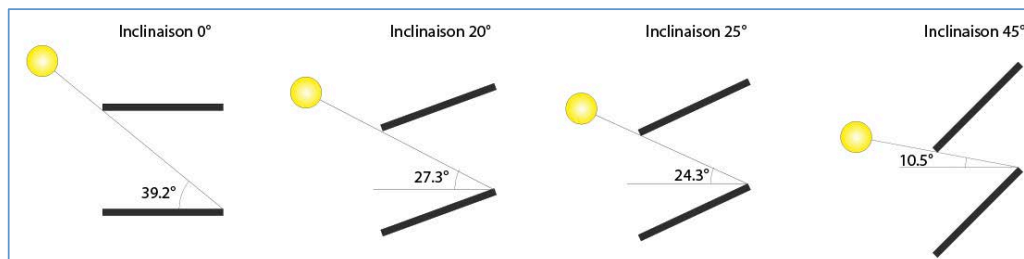


Figure 31 : l'inclinaison des lames est calculée de façon à couper le rayonnement direct

Lorsque le soleil est absent, les stores sont relevés de façon à profiter de la lumière diffuse

Afin de réduire le nombre de mouvements (perturbation des utilisateurs) un temps de latence d'une heure est observé entre chaque mouvement.

4.4.2 Scénario 2 « RESET »

Ce scénario est basé sur des mouvements ponctuels ayant lieu en l'absence des utilisateurs (le matin avant la prise de poste et pendant la pause-déjeuner).

Nous avons constaté (cf. § 4.1.3) que le pourcentage d'occultation des fenêtres par les stores était très important. Nous interprétons ceci de la façon suivante :

- Lorsque les utilisateurs sont confrontés à un problème d'éblouissement, la probabilité qu'ils baissent les stores est très élevée.
- A l'inverse, lorsque la source d'éblouissement (soleil) disparaît, la probabilité qu'ils relèvent les stores est très faible.
- Simplement, les gens n'y pensent pas et le système d'éclairage artificiel est alors utilisé pour palier le manque de lumière à l'intérieur des locaux.

Sachant que le but de cette étude est de quantifier le potentiel d'économie d'énergie lié à l'éclairage artificiel, nous avons donc décidé de forcer l'ouverture des stores en vue de réduire la fraction d'occultation moyenne des fenêtres.

Le principe consiste donc à donner périodiquement (deux fois par jour) des ordres d'ouverture complète des stores.

4.4.2.1 Condition sur l'ÉBLOUISSEMENT

Ce scénario ne règle pas la question de l'éblouissement de façon automatisée. Pour être représentatif du comportement probable de l'utilisateur, on suppose alors que si celui-ci est ébloui, alors il baissera les stores pour optimiser son confort visuel (la position et l'inclinaison des lames sont précisées ci-après en fonction de la façade).

A chaque pas de temps, nous calculons donc l'indice d'éblouissement (Daylight Glare Probability [2]) d'un utilisateur « typique » situé à proximité de la fenêtre (cf. Figure 32).

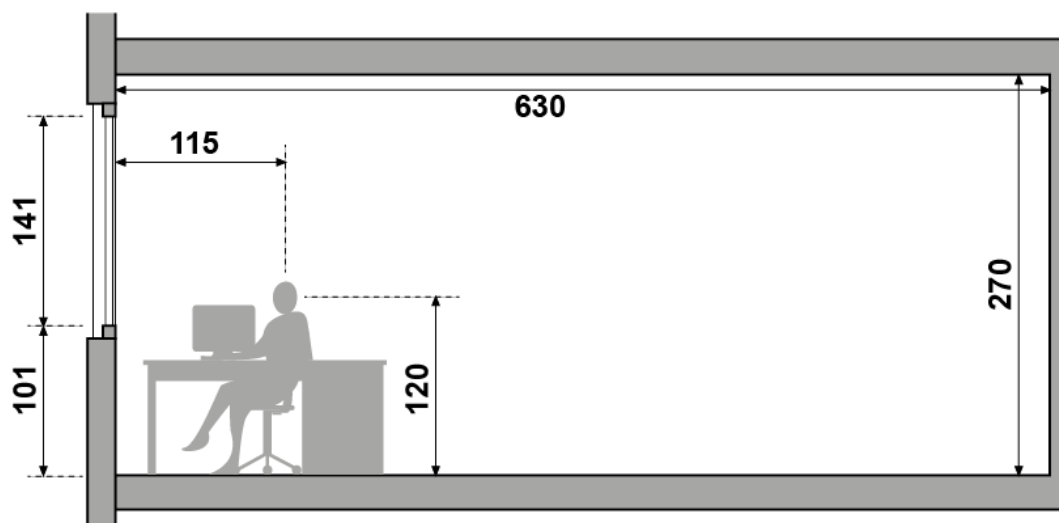


Figure 32 : position de l'utilisateur dans le local (coupe)

Dans le cas standard, la valeur limite du DGP est de 0.45. Lorsque cette valeur est dépassée, on considère que l'utilisateur est ébloui et le store est donc abaissé.

Pourcentage d'occultation

Le pourcentage d'occultation est adapté en fonction de la saison. En hiver (soleil bas), nous baissions le store jusqu'en bas, alors qu'en été, (soleil est plus haut dans le ciel), le store est seulement baissé au trois quarts.

- En été : si $DGP > 0.45$ est store est baissé à 75% (cf. Figure 30 **gauche**).
- En hiver : si $DGP > 0.45$, le store est baissé à 100% (cf. Figure 30 **droite**).

Inclinaison des lames

L'inclinaison des lames est basée sur la hauteur du soleil.

- Pour la façade Est, le store sera abaissé dès que le DGP est supérieur à 0.45 et ne bougera plus jusqu'au prochain mouvement de reset (pause-déjeuner). Comme le soleil est en phase ascendante, le premier réglage bloque les rayons solaires pour toutes heures suivantes.
- Pour la façade Ouest, le store sera abaissé dès que le DGP est supérieur à 0.45. Comme le soleil est en phase descendante, plusieurs mouvements consécutifs sont possibles (max. 1 par heure).
- Pour la façade Sud, on applique le matin le scénario décrit pour la façade Est et l'après-midi celui de la façade Ouest.

4.5 Stores à lames : Comparaison des valeurs utilisateurs avec les deux automatismes pour un éclairage requis de 500 lux

Ce chapitre permet de comparer l'autonomie en lumière du jour obtenue par les utilisateurs avec les résultats des deux scénarios d'automatismes décrits précédemment (cf. **chapitre 6**).

Pour faciliter la lecture des résultats, nous avons pour chaque orientation, reporté sur un même graphique les valeurs d'autonomie obtenues avec les deux automatismes testés et les valeurs maximale, médianes et minimales reflétant le comportement des utilisateurs.

Dans ces représentations, on notera que :

- La courbe verte correspond au maximum de l'ensemble des valeurs observées.
- La courbe jaune correspond à la médiane des valeurs observées (50% des utilisateurs se situent en dessus et 50% en dessous).
- La courbe rouge correspond au minimum de l'ensemble des valeurs observées.
- La courbe en pointillé bleu sombre correspond à l'automatisme « CONTINUOUS ».
- La courbe en pointillé bleu clair correspond à l'automatisme « RESET ».

4.5.1 Comparaisons pour un éclairage intérieur de 500 lux

Les figures qui suivent présentent les profils d'autonomie pour un éclairage intérieur de 500 lux dans les locaux orientés respectivement au Sud, à l'Est et à l'Ouest.

Façade Sud

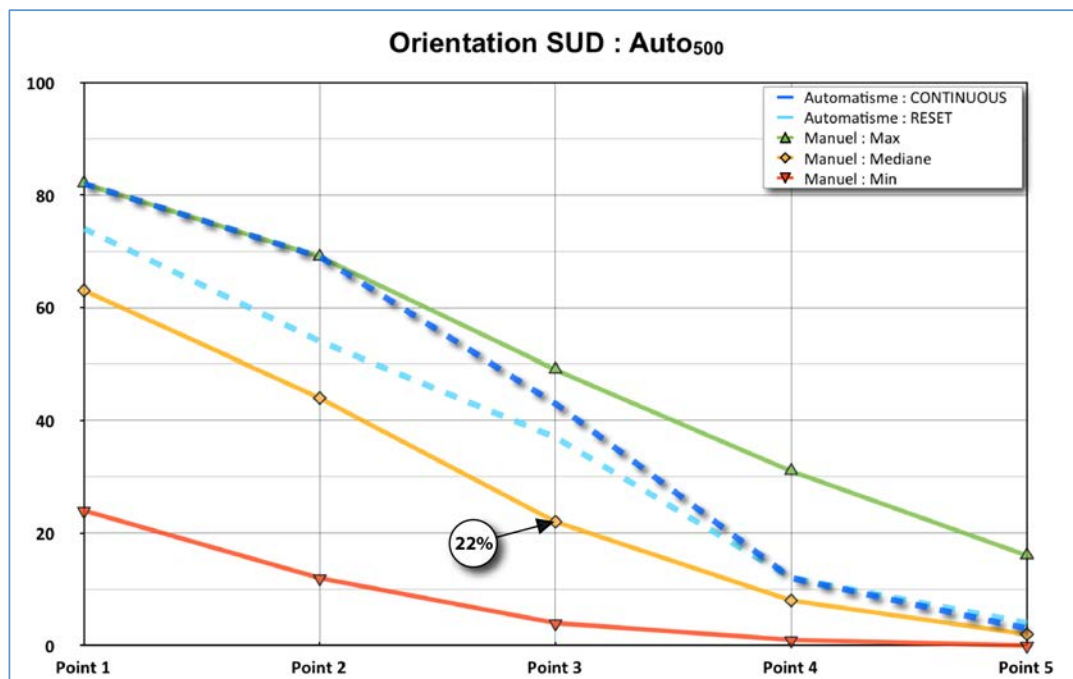


Figure 33 : Façade SUD, profils d'autonomie pour un éclairage 500 lux.

Comme indiqué précédemment, l'écart entre la meilleure et la moins bonne performance obtenue par les utilisateurs est très important. On notera en premier lieu que l'automatisme

« CONTINUOUS » permet d'atteindre des performances comparables à celles obtenues par les utilisateurs les plus « permissifs » (Maxi) pour les deux points les plus proches de la fenêtre (Points 1 et 2).

Au centre du local, l'automatisme réduit un peu la valeur moyenne de l'autonomie, puis, pour les deux points les plus éloignés de la façade, la performance se réduit encore jusqu'à se rapprocher de la valeur médiane.

On notera aussi que l'automatisme « RESET », bien que légèrement moins performant que l'automatisme « CONTINUOUS », est sensiblement au dessus de la valeur médiane sur la première moitié du local.

Si l'on se réfère au nombre annuel d'heure d'utilisation des bureaux (7h-18h, 5 jours/semaine, 52 semaines/an, soit 2'860 heures), le nombre d'heures pendant lesquelles l'éclairement sera supérieur à 500 lux au centre du local peut être déduit de l'autonomie.

Ainsi, par exemple, pour la valeur médiane ($Auto_{500} = 22\%$), le nombre heures pendant le quel l'éclairement intérieur dépassera 500 lux au point 3 est égal à :

$$H_{Auto500} = 2'860 * 22/100 = 629 \text{ h}$$

On peut alors logiquement en déduire que le nombre théorique d'heures annuelles d'enclenchement sera égal à :

$$H_{Enclenchement} = 2'860 - 629 = 2231 \text{ h}$$

Le Tableau 8 généralise cette approche aux autres profils. On constate que la réduction du nombre d'heures d'enclenchement apportée par les automatismes est très conséquente (400 à 600 heures à par rapport à l'utilisateur « Médian »).

Façade SUD	$Auto_{500}$	$H_{Auto500}$	Heures Enclenchement
Manuel Maxi	49%	1'401 h	1'459 h
Manuel Médian	22%	629 h	2'231 h
Manuel Mini	4%	114 h	2'746 h
Automatisme CONTINUOUS	43%	1'230 h	1'630 h
Automatisme RESET	37%	1'058 h	1'802 h

Tableau 8 : Récapitulatif des heures d'autonomie et d'enclenchement pour un éclairement requis de 500 lux pour la façade SUD (au centre du local).

Façade Est

La Figure 34 ci-après montre que l'automatisme « CONTINUOUS » permet d'atteindre des performances supérieures à celles obtenues par les utilisateurs les plus « permissifs » (Maxi) sur la première moitié du local.

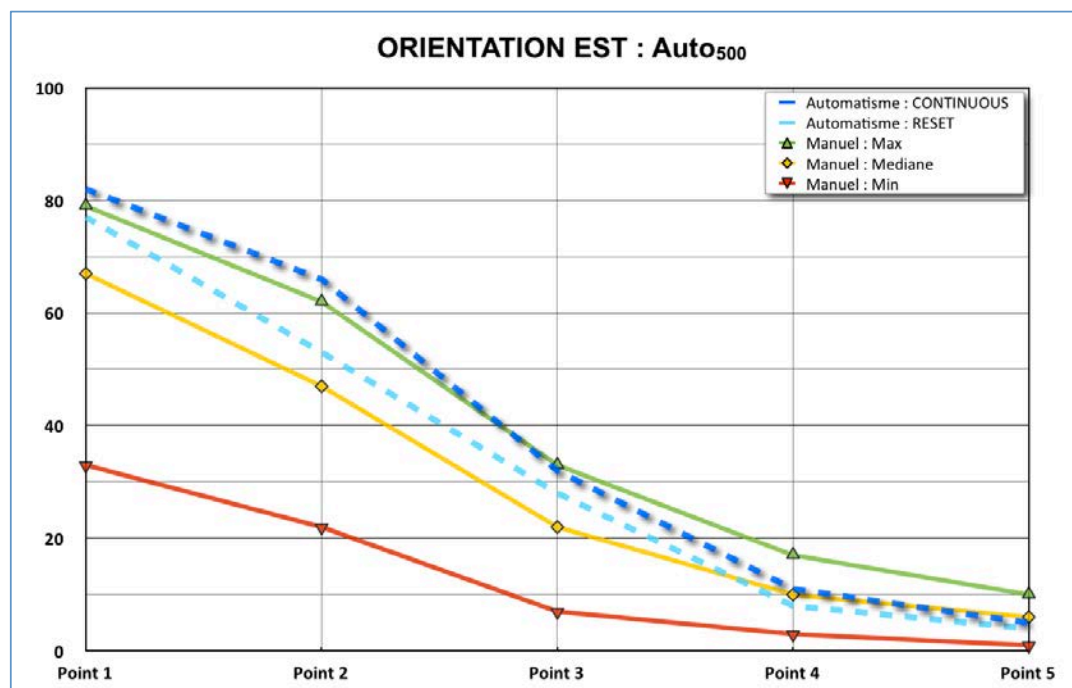


Figure 34 : Façade EST profils d'autonomie pour un éclairage 500 lux.

Sur cette orientation, l'automatisme « RESET » offre une performance proche de celle de l'automatisme « CONTINUOUS ».

Le Tableau 9 établit le récapitulatif de l'autonomie au centre du local et des heures d'enclenchement pour un éclairage requis de 500 lux.

Façade EST	Auto ₅₀₀	H _{Auto500}	Heures Enclenchement
Manuel Maxi	33%	944 h	1'916 h
Manuel Médian	22%	629 h	2'231 h
Manuel Mini	7%	200 h	2'660 h
Automatisme CONTINUOUS	32%	915 h	1'945 h
Automatisme RESET	28%	801 h	2'059 h

Tableau 9 : Récapitulatif des heures d'autonomie et d'enclenchement pour un éclairage requis de 500 lux pour la façade EST (au centre du local).

Façade Ouest

La Figure 35 fait apparaître une dispersion considérable entre les valeurs Max, Médiane et Min. L'automatisme « CONTINUOUS » permet d'atteindre des performances très proches de celles obtenues par les utilisateurs les plus « permissifs » (Max) sur les 2 premiers points du local.

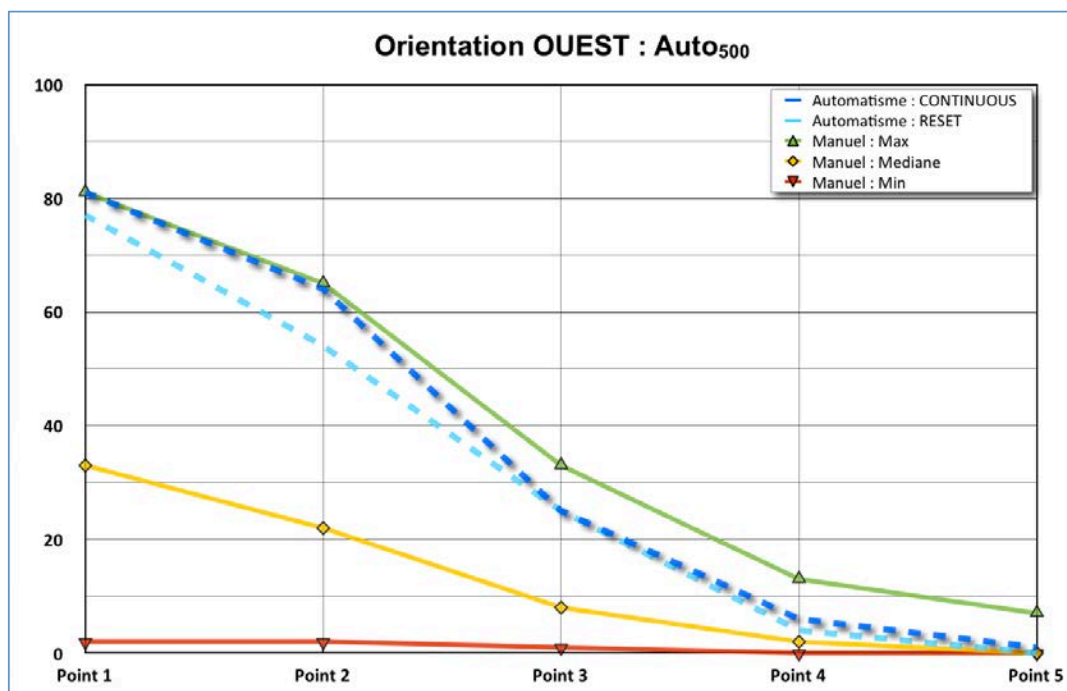


Figure 35 : Façade OUEST, profils d'autonomie pour un éclairage 500 lux.

Sur cette orientation, comme pour l'orientation EST, on constate que l'automatisme « RESET » offre une performance très proche de celle de l'automatisme « CONTINUOUS ».

Le Tableau 10 établit le récapitulatif de l'autonomie au centre du local et des heures d'enclenchement pour un éclairage requis de 500 lux.

Façade OUEST	Auto ₅₀₀	H _{Auto500}	Heures Enclenchement
Manuel Maxi	33%	944 h	1'916 h
Manuel Médian	8%	229 h	2'631 h
Manuel Mini	1%	29 h	2'831 h
Automatisme CONTINUOUS	25%	715 h	2'145 h
Automatisme RESET	25%	715 h	2'145 h

Tableau 10 : Récapitulatif des heures d'autonomie et d'enclenchement pour un éclairage requis de 500 lux pour la façade OUEST (au centre du local).

4.5.1.1 Synthèse sur les automatismes de stores avec une exigence de 500 lux au centre du local

Le Tableau ci-dessous établit la moyenne pondérée des résultats obtenus au centre du local pour les 3 façades observées, avec un éclairage intérieur requis de 500 lux.

Moyenne pondérée 3 façades	Auto ₅₀₀	H _{Auto500}	Heures Enclenchement
Manuel Maxi	38%	1'098 h	1'762 h
Manuel Médian	16%	448 h	2'412 h
Manuel Mini	3%	95 h	2'765 h
Automatisme CONTINUOUS	33%	930 h	1'930 h
Automatisme RESET	30%	850 h	2'010 h

Tableau 11 : Récapitulatif des heures d'autonomie et d'enclenchement pour l'ensemble des façades (moyennes pondérées) pour un éclairage requis de 500 lux (au centre du local).

L'observation des résultats présentés ci-dessus peut être résumée comme suit :

- L'automatisme CONTINUOUS permet de maximiser l'autonomie en lumière du jour. Sur les deux premiers points du local, la performance est égale ou supérieure à celle obtenue par les utilisateurs les plus *permissifs* (Maxi). Au centre du local, le profil d'autonomie décroche un peu mais l'autonomie reste très largement supérieure à celle de l'utilisateur *Médian*. En fond de local, l'autonomie est similaire à celle obtenue par l'utilisateur *Médian*.
- L'automatisme RESET présente des performances légèrement inférieures à celle de l'automatisme CONTINUOUS. Sur les deux premiers points, l'écart d'autonomie est en moyenne inférieur à 10%. Au fond du local, l'autonomie est similaire à celle obtenue par l'utilisateur *Médian*.
- En comparaison avec un utilisateur médian, la réduction du nombre d'heures d'enclenchement apportée par l'automatisme CONTINUOUS s'élève à 20% pour un éclairage requis de 500 lux.
- En comparaison avec un utilisateur médian, la réduction du nombre d'heures d'enclenchement apportée par l'automatisme RESET est proche de 17% pour un éclairage requis de 500 lux.

4.5.2 Comparaisons pour un seuil d'enclenchement à 150 lux

Nous avons vu au chapitre 4.3 que le seuil d'enclenchement des utilisateurs est nettement inférieur à 500 lux. Pour cette raison, nous pensons qu'il est important d'examiner les performances des automatismes pour des valeurs d'éclairement requises plus faibles. Dans les pages qui suivent, nous nous intéressons donc aux valeurs d'autonomie pour un niveau de 150 lux au centre du local, ce qui correspond à la limite haute d'enclenchement observée au § 4.3.1, page 31.

Nous examinons donc ci-après le cas d'un comportement représentatif où les utilisateurs allument les lampes lorsque l'éclairement au centre du local est inférieur à 150 lux et les éteignent au moment où ils quittent leur poste de travail, soit à 13h soit à 18h.

Façade Sud

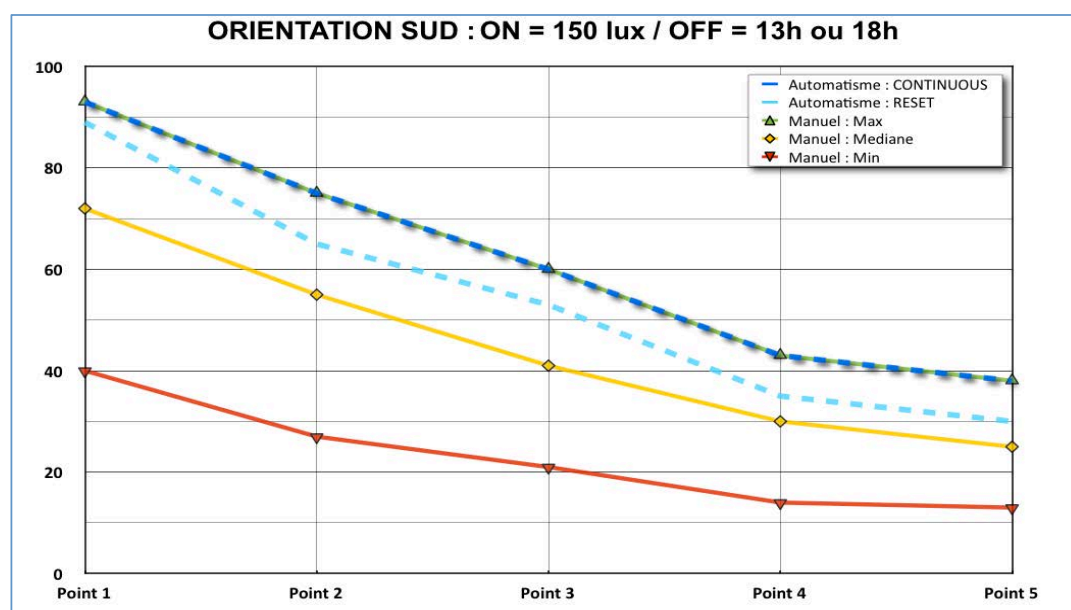


Figure 36 : Façade SUD, profils d'autonomie pour un seuil d'allumage de 150 lux et une extinction lors des pauses (à 13h ou 18h).

L'automatisme CONTINUOUS permet d'atteindre les mêmes performances que l'utilisateur le plus permissif (Manuel Maxi).

Façade SUD	Auto ₁₅₀	H _{Auto150}	Heures Enclenchement
Manuel Maxi	60%	1'716 h	1'144 h
Manuel Médian	41%	1'173 h	1'687 h
Manuel Mini	21%	601 h	2'259 h
Automatisme CONTINUOUS	60%	1'716 h	1'144 h
Automatisme RESET	53%	1'516 h	1'344 h

Tableau 12 : Récapitulatif des heures d'autonomie et d'enclenchement pour un seuil d'allumage de 150 lux au centre du local et une extinction lors des pauses (façade SUD).

Façade Est

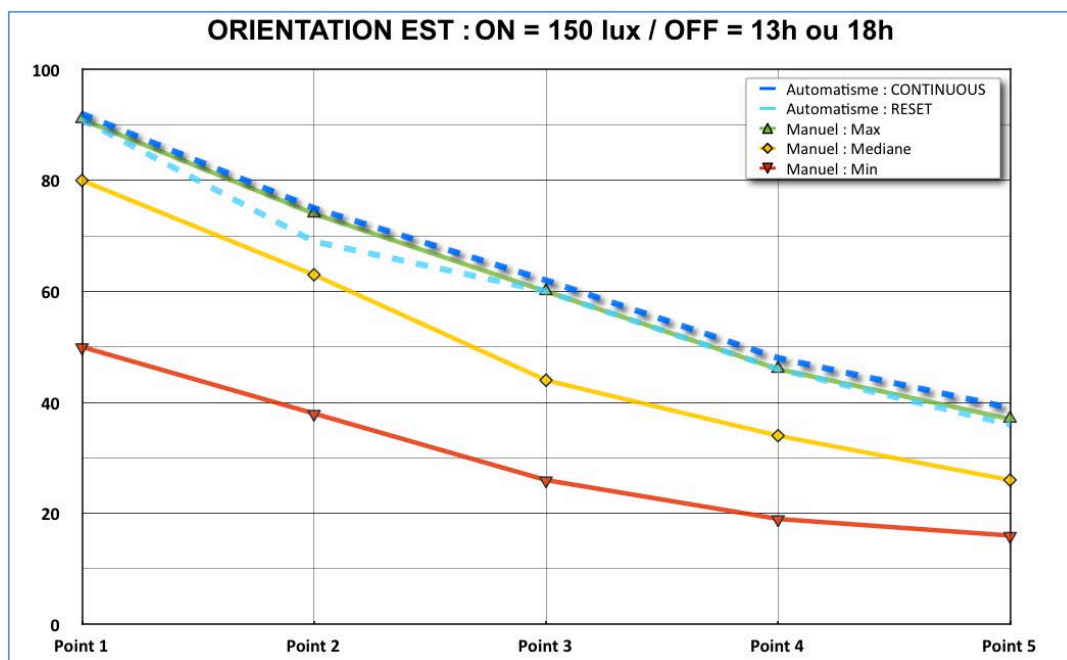


Figure 37 : Façade EST, profils d'autonomie pour un seuil d'allumage de 150 lux et une extinction lors des pauses.

L'automatisme CONTINUOUS permet d'atteindre des performances légèrement supérieures à celles de l'utilisateur le plus permissif (Manuel Maxi).

L'automatisme RESET suit la même tendance avec un décalage vers le bas de l'ordre de 3%.

Façade EST	Auto ₁₅₀	H _{Auto150}	Heures Enclenchement
Manuel Maxi	78%	2'231 h	629 h
Manuel Médian	65%	1'859 h	1'001 h
Manuel Mini	43%	1'240 h	1'620 h
Automatisme CONTINUOUS	78%	2'231 h	629 h
Automatisme RESET	75%	2'145 h	715 h

Tableau 13 : Récapitulatif des heures d'autonomie et d'enclenchement pour un seuil d'allumage de 150 lux au centre du local et une extinction lors des pauses (façade EST).

Façade Ouest

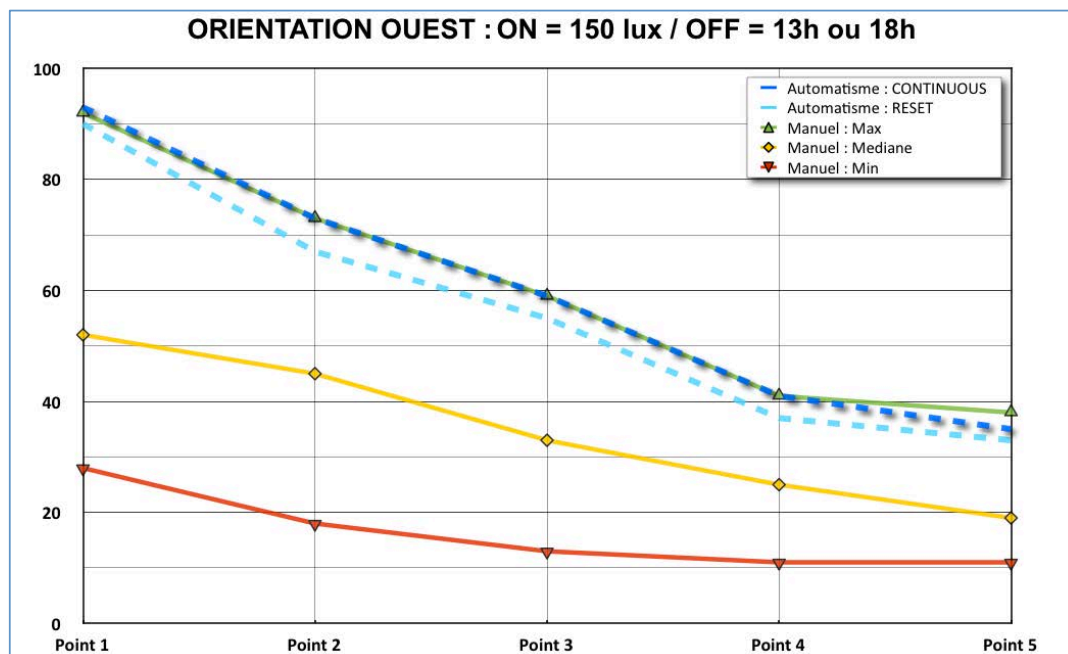


Figure 38 : Façade OUEST, profils d'autonomie pour un seuil d'allumage de 150 lux au centre du local et une extinction lors des pauses (façade OUEST).

L'automatisme CONTINUOUS permet d'atteindre des performances similaires à celles de l'utilisateur le plus permissif (Manuel Maxi).

L'automatisme RESET suit la même tendance avec un décalage vers le bas de l'ordre de 5%.

Façade OUEST	Auto ₁₅₀	H _{Auto150}	Heures Enclenchement
Manuel Maxi	78%	2'231 h	629 h
Manuel Médian	52%	1'487 h	1'373 h
Manuel Mini	13%	372 h	2'488 h
Automatisme CONTINUOUS	78%	2'231 h	629 h
Automatisme RESET	75%	2'145 h	715 h

Tableau 14 : Récapitulatif des heures d'autonomie et d'enclenchement pour un seuil d'allumage de 150 lux et une extinction lors des pauses, pour la façade OUEST.

4.5.2.1 Synthèse sur les automatismes de stores avec un seuil d'enclenchement de 150 lux au centre du local et une extinction lors des pauses

Le Tableau ci-dessous établit la moyenne pondérée des résultats obtenus pour les 3 façades observées pour un éclairage intérieur requis de 100 lux.

Moyenne pondérée 3 façades	Auto ₁₅₀	H _{Auto150}	Heures Enclenchement
Manuel Maxi	60%	1'716 h	1'144 h
Manuel Médian	38%	1'087 h	1'773 h
Manuel Mini	18%	515 h	2'345 h
Automatisme CONTINUOUS	60%	1'716 h	1'144 h
Automatisme RESET	55%	1'573 h	1'287 h

Tableau 15 : Récapitulatif des heures d'autonomie et d'enclenchement pour un seuil d'allumage de 150 lux et une extinction lors des pauses, pour l'ensemble des façades (moyenne pondérée).

L'observation des résultats présentés ci-dessus peut être résumée comme suit :

- Le gain apporté par les deux automatismes est très significatif.
- En comparaison avec un utilisateur médian, la réduction des heures d'enclenchement liée à l'automatisme CONTINUOUS, est d'environ 35%.
- En comparaison avec un utilisateur médian, la réduction de la consommation liée à l'automatisme RESET, est de 27%.

4.6 Etude de variantes de protections solaires

4.6.1 Stores à lames : influence de la clarté des lames

Des simulations ont été conduites pour déterminer l'influence de la clarté des lames (Automatisme CONTINUOUS).

- La configuration de référence (« Lames REF ») correspond à la situation existante, avec un facteur de réflexion mesuré de 0.30.

Les simulations ont porté sur 3 variantes, soit, respectivement :

- Lames « Sombres » : $r = 0.10$
 - Lames « Claires » : $r = 0.50$
 - Lames « Très Claires » : $r = 0.70$
- (r = facteur de réflexion)

Dans chacun des cas, nous avons considéré que la brillance des lames était négligeable.

La Figure 39 et les deux suivantes montrent l'influence de la clarté des lames pour les trois orientations observées.

Façade Sud

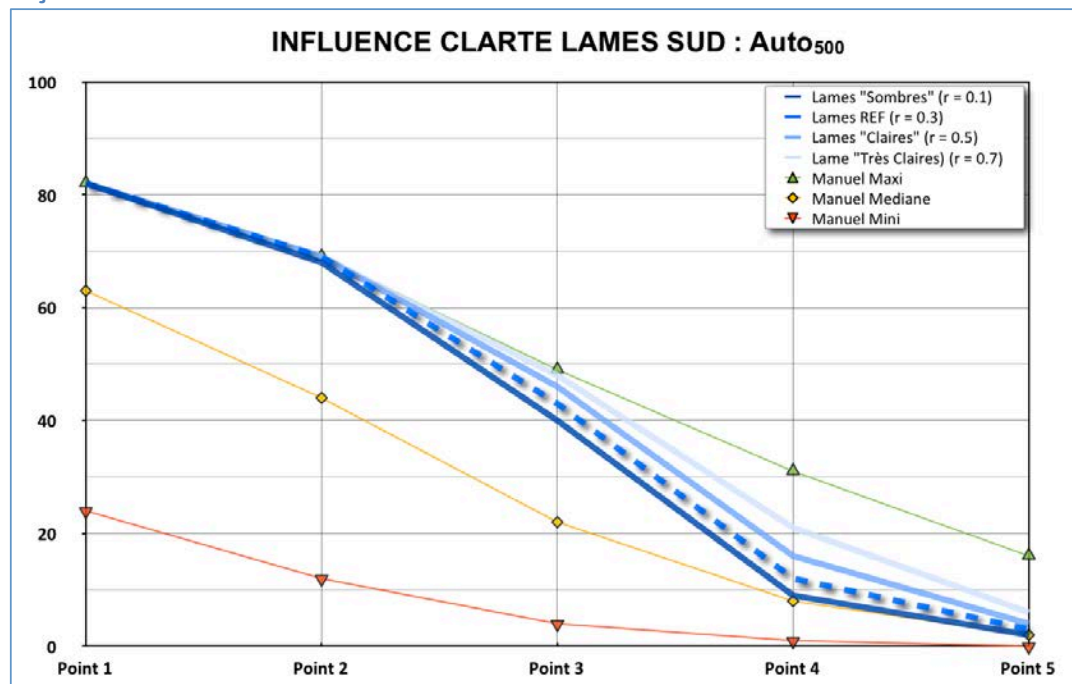


Figure 39 : SUD : Comparaison des résultats obtenus en fonction de la clarté des lames.

Façade Est

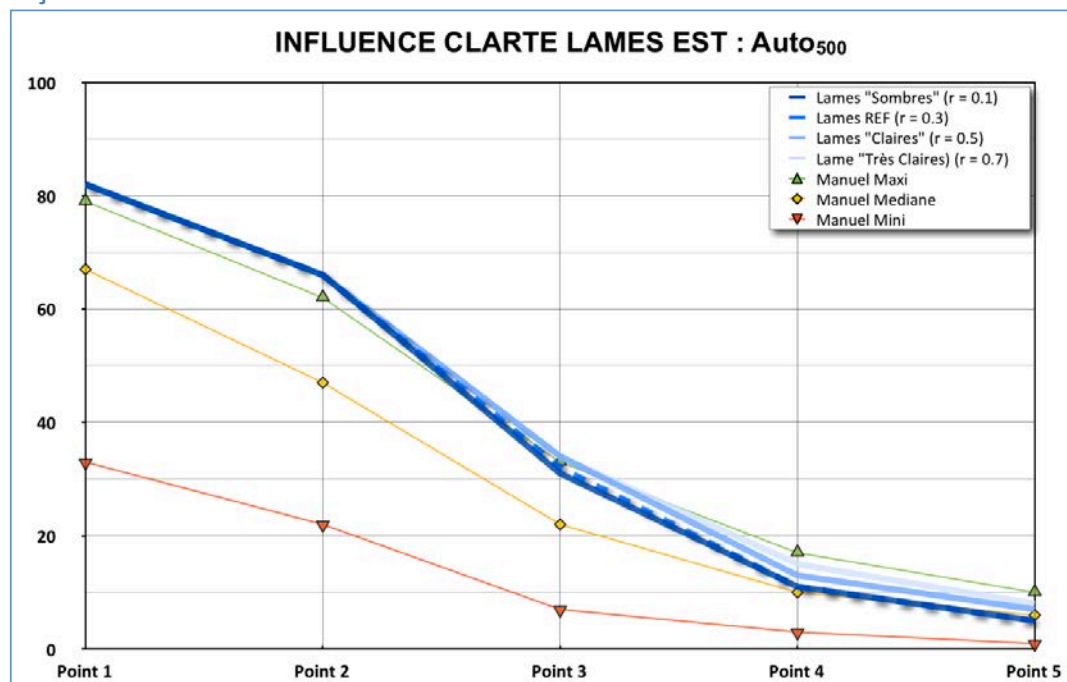


Figure 40 : EST : Comparaison des résultats obtenus en fonction de la clarté des lames.

Façade Ouest

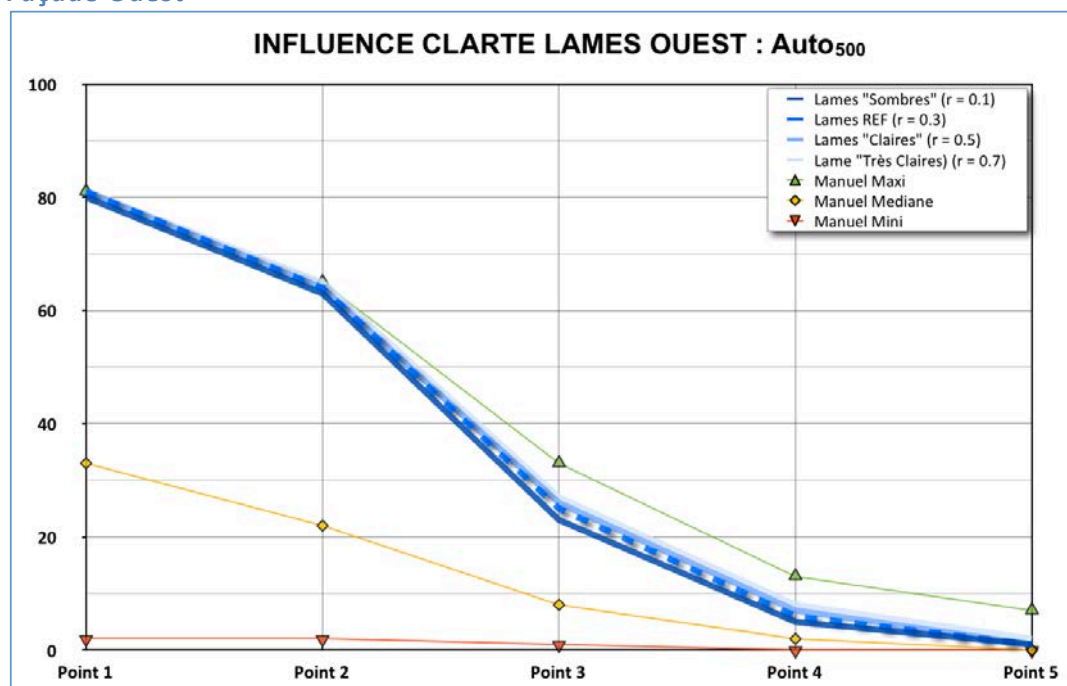


Figure 41 : OUEST : Comparaison des résultats obtenus en fonction de la clarté des lames.

L'observation des Figure 39 à 41 permet d'établir les constatations suivantes :

- A proximité de l'ouverture, la clarté des lames n'a aucune influence sur la disponibilité de lumière du jour.
- En fond de pièce, l'influence est très légère.
- Des écarts plus importants sont observés dans le cas de l'orientation Sud. Nous pouvons avancer l'explication suivante : pour cette orientation, les lames sont plus souvent en position horizontale (soleil haut). En conséquence le flux réfléchi sur la face supérieure des lames est donc plus facilement redirigé vers l'intérieur du local que lorsque les lames sont plus inclinées (afin de bloquer le soleil bas en début et fin de journée pour les orientations Est et Ouest).

4.6.2 Stores en toile

Une série de simulations a été conduite pour évaluer les performances de trois types de stores en toile.

Store « Diffusant 1 » (blanc sable)

Ce type de store permet de bloquer la majeure partie des rayons directs, tout en transmettant une partie de la lumière de façon totalement diffuse. Une vision partielle de l'environnement extérieur est conservée, mais de manière ténue.

Les caractéristiques de transmission utilisées pour les calculs ont été les suivantes :

- Transmission diffuse : $T_{dif} = 0.08$
- Transmission directe : $T_{dir} = 0.10$
- Réflexion dans le visible : $R_v = 0.52$

Store « Diffusant 2 » (lin)

Ce store constitue une variante du précédent. Les transmissions directe et diffuse et le facteur solaire sont ici plus faibles, ce qui augmente la protection contre les surchauffes et l'éblouissement.

Les caractéristiques de transmission utilisées pour les calculs ont été les suivantes :

- Transmission diffuse : $T_{dif} = 0.06$
- Transmission directe : $T_{dir} = 0.04$
- Réflexion dans le visible : $R_v = 0.53$

Store « Opaque » (gris blanc)

Ce type de store bloque entièrement la lumière incidente. Vus depuis l'intérieur, ces protections solaires sont sombres et la vision vers l'extérieur est impossible.

Les caractéristiques de transmission utilisées pour les simulations ont été les suivantes :

- Transmission diffuse : $T_{dif} = 0.00$
- Transmission directe : $T_{dir} = 0.00$
- Réflexion dans le visible : $R_v = 0.43$

Dans les pages qui suivent, les mouvements de stores en toile sont gérés avec les mêmes automatismes que ceux décrits pour les stores à lames (cf. § 4.4.1 et 4.4.2, page 34 et suivantes)

Façade Sud

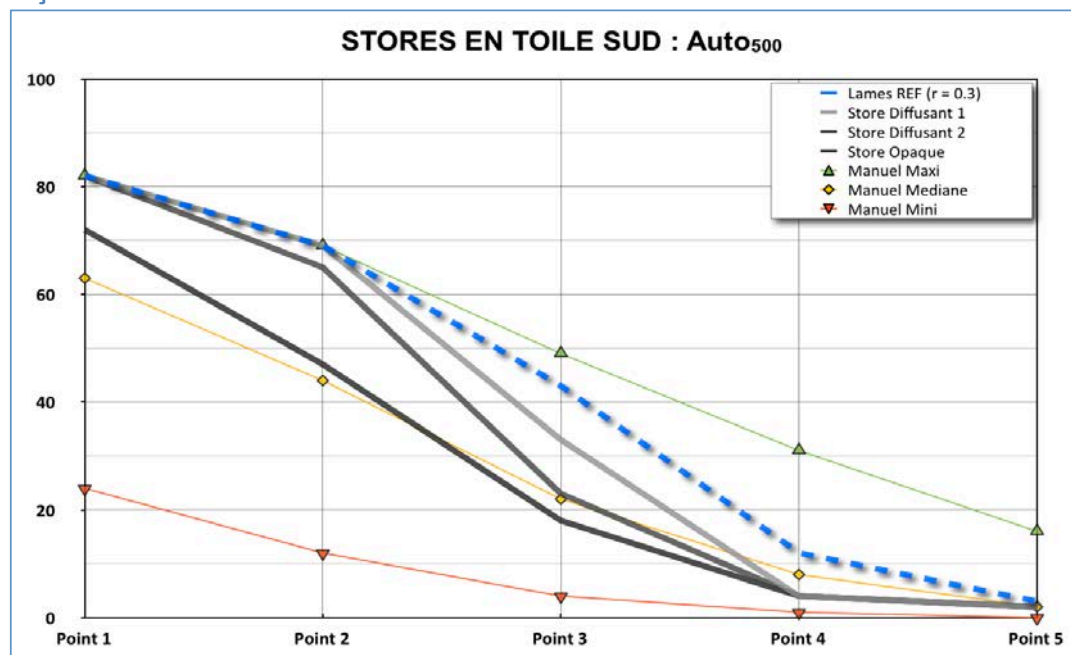


Figure 42 : Comparaison des résultats obtenus en fonction du type de store en toile pour l'orientation SUD. La courbe en trait discontinu correspond aux lames existantes (Lames REF, avec un facteur de réflexion égal à 0.3).

Façade Est

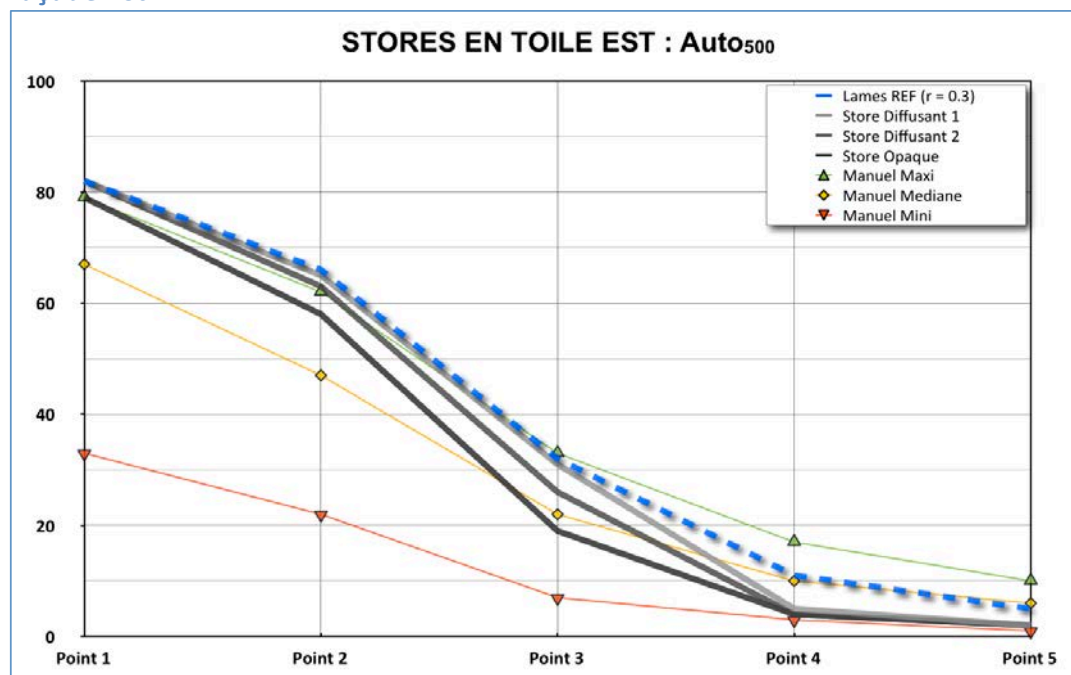


Figure 43 : Comparaison des résultats obtenus en fonction du type de store en toile pour l'orientation EST. La courbe en trait discontinu correspond aux lames existantes (Lames REF, avec un facteur de réflexion égal à 0.3).

Façade Ouest

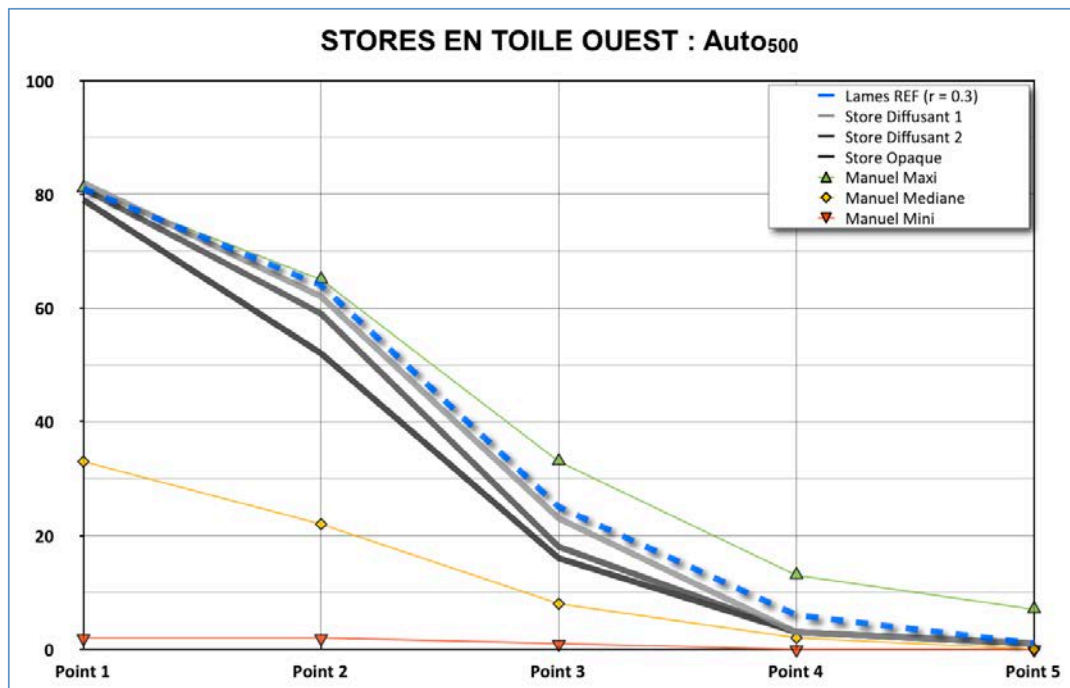


Figure 44 : Comparaison des résultats obtenus en fonction du type de store en toile pour l'orientation OUEST. La courbe en trait discontinu correspond aux lames existantes (Lames REF, avec un facteur de réflexion égal à 0.3).

L'observation des figures ci-dessus permet de tirer les conclusions suivantes :

- Les stores en toile présentent systématiquement des performances inférieures à celle des stores à lames.
- Le store diffusant 1 est toutefois très proche du store à lame, notamment pour les orientations Est et Ouest.
- Logiquement, le store diffusant 2 est un peu moins performant.
- Le store opaque présente les moins bonnes performances.

4.6.3 Vitrages à teinte variable

Le niveau de teinte d'un vitrage à teinte variable électroniquement (type SageGlass) peut être ajusté automatiquement ou manuellement en réponse au niveau d'éclairement extérieur afin de protéger les occupants de l'éblouissement et de la chaleur solaire. En s'assombrissant jusqu'à moins de 1% de transmission lumineuse, ce type de vitrage se substitue aux protections solaires traditionnelles et reste toujours transparent, permettant d'augmenter le confort des occupants en maintenant la vue vers l'environnement extérieur toute l'année (cf. description succincte en Annexe, page 84).

Nous entrevoyons un potentiel d'application intéressant pour la rénovation (notamment pour les bâtiments classés et les bâtiments administratifs de grande hauteur pour lesquels les protections extérieures posent un problème d'intégration). Il nous a donc paru intéressant de les examiner afin de pouvoir les comparer aux solutions existantes.

On notera que ce type de vitrage peut comporter plusieurs zones de contrôle par vitrage (jusqu'à 3). La teinte peut être changée de façon indépendante sur chaque partie du vitrage. La Figure 45 ci-après décrit la stratégie de contrôle utilisée pour moduler la transmission lumineuse des vitrages [8].

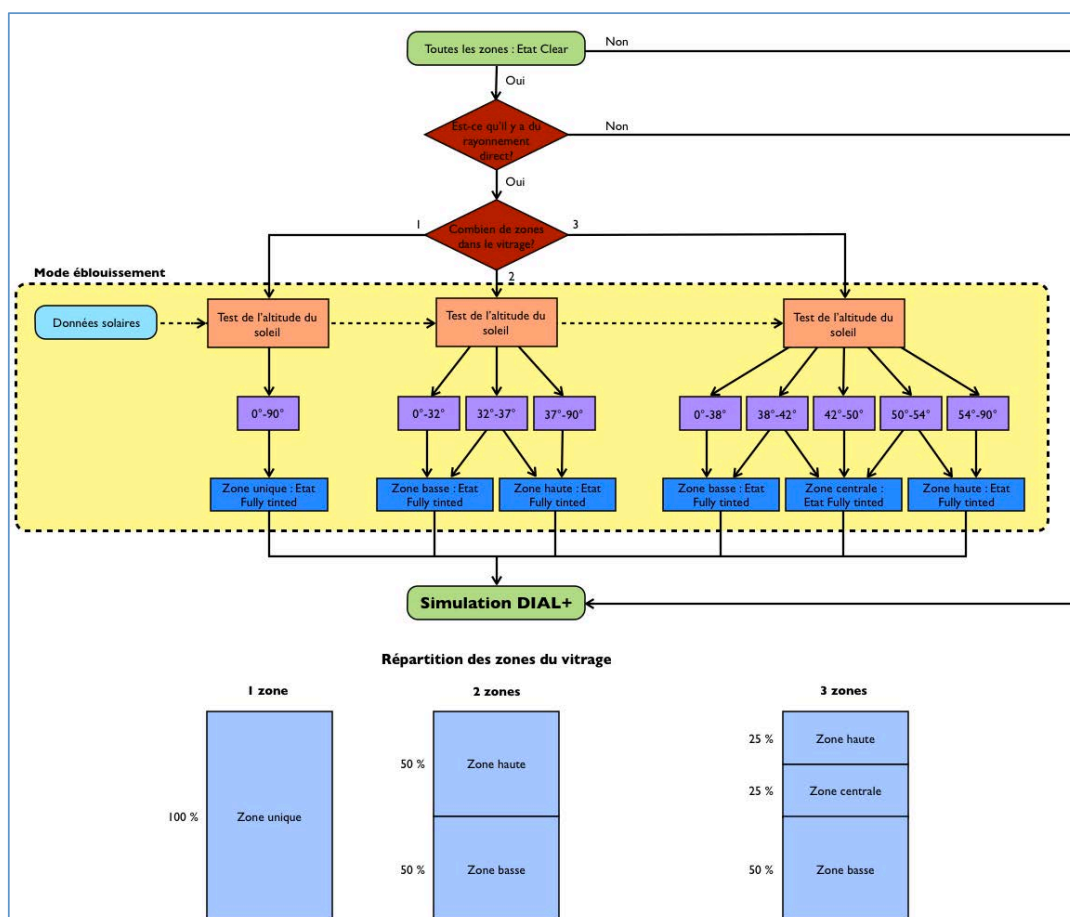


Figure 45 : Description de l'automatisme de contrôle de la clarté des vitrages

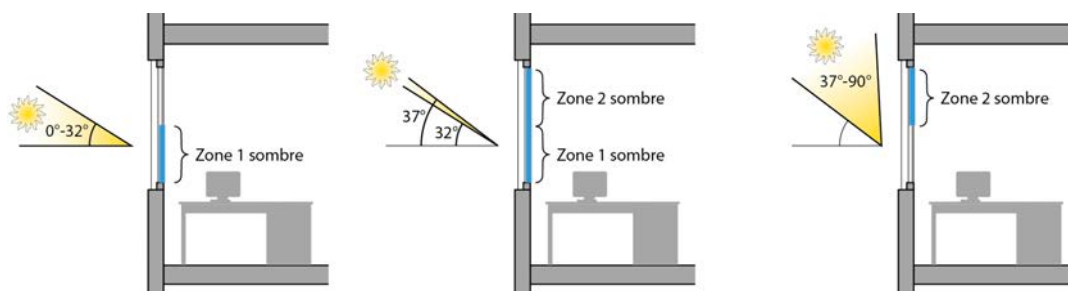


Figure 46 : Illustration schématique de la façon dont sont contrôlées les différentes zones du vitrage en fonction de la hauteur du soleil (cas où le vitrage est séparé en 2 zones).

D'autres règles pourraient être appliquée selon l'utilisation du local et l'emplacement de l'utilisateur. Nous avons ici évalué l'autonomie à 500 lux pour le vitrage électrochrome avec 1, 2 et 3 zones de contrôle et comparé les résultats obtenus pour les 3 orientations examinées avec les comportements décrits précédemment.

Les résultats obtenus peuvent être observés sur les trois figures suivantes.

Façade Sud

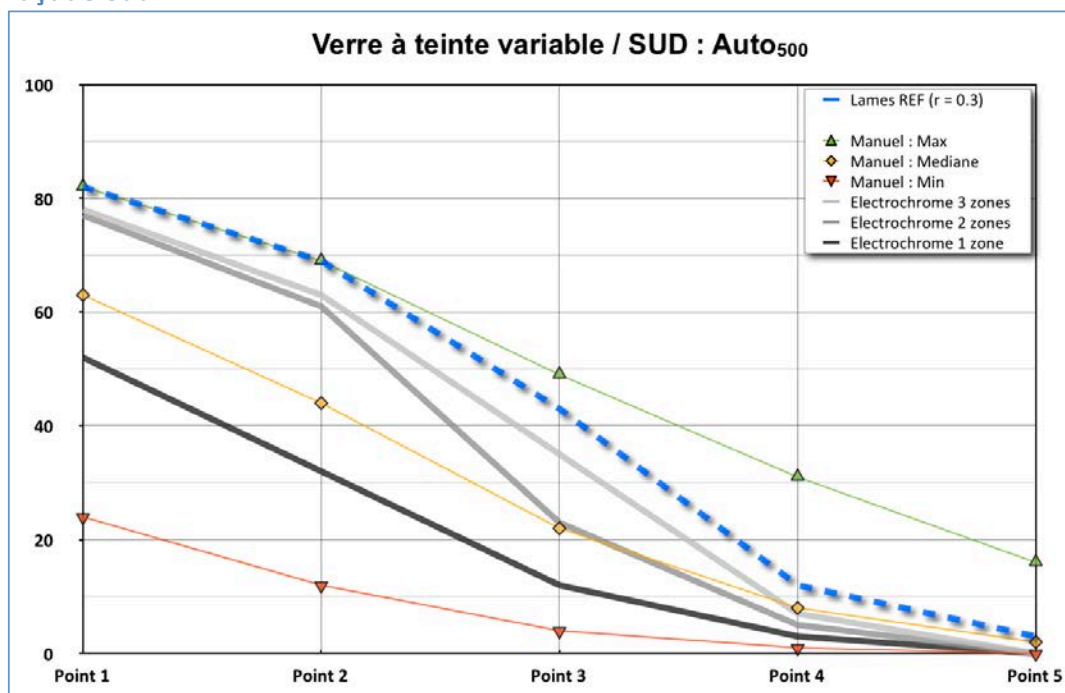


Figure 47 : Orientation SUD : Comparaison des résultats obtenus avec les vitrages à teinte variable (SageGlass). La courbe en trait discontinu correspond aux lames existantes (Lames REF/CONTINUOUS, avec un facteur de réflexion égal à 0.3).

Façade Est

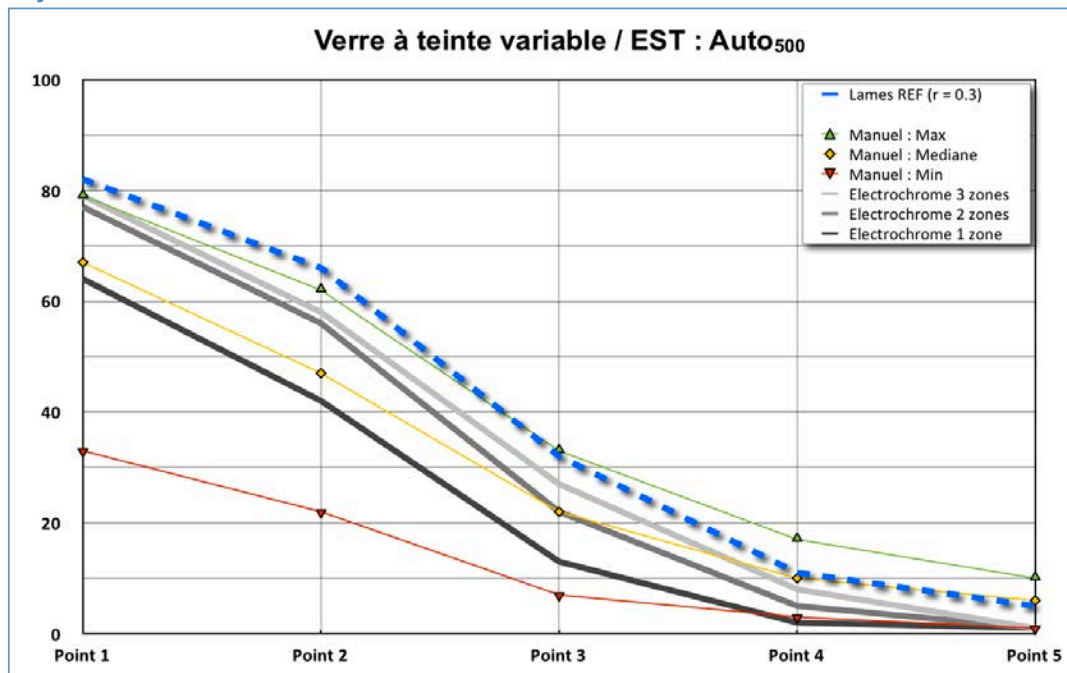


Figure 48 : Orientation EST: Comparaison des résultats obtenus avec les vitrages à teinte variable (SageGlass). La courbe en trait discontinu correspond aux lames existantes (Lames REF/CONTINUOUS, avec un facteur de réflexion égal à 0.3).

Façade Ouest

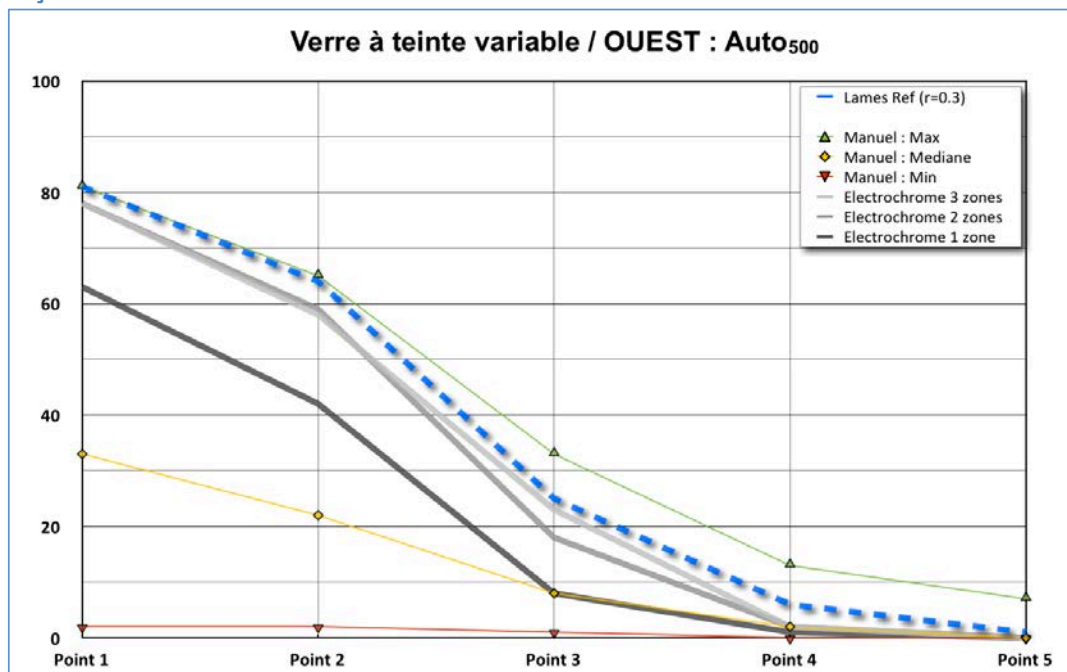


Figure 49: Orientation OUEST: Comparaison des résultats obtenus avec les vitrages à teinte variable (SageGlass). La courbe en trait discontinu correspond aux lames existantes (Lames REF/CONTINUOUS, avec un facteur de réflexion égal à 0.3).

L'observation des résultats obtenus avec les verres à teinte variable ci-dessus permet de tirer les conclusions suivantes :

- Les variantes à 2 et 3 zones de contrôle permettent d'obtenir des performances relativement proches de celle des stores à lames (CONTINUOUS). On notera que l'écart est principalement dû au facteur de transmission de ces verres.
- La comparaison avec un vitrage dont le facteur de transmission lumineuse est de 0.60 (ex. vitrage triple ou vitrage double à contrôle solaire), a montré que les résultats des verres à teinte variable sont identiques à ceux obtenus avec des stores à lames automatisées (cf. § 8.3.2, page 86).
- La variante à une zone montre des performances systématiquement inférieures à l'utilisateur médian et ne semble donc pas applicable dans ce cas.

4.7 Consommation d'électricité liée à l'éclairage

Dans ce chapitre nous évaluons la consommation d'électricité liée à l'éclairage artificiel en comparant le calcul selon de la norme 380/4 avec les simulations réalisées d'après les observations (valeurs pondérées par le nombre d'ouvertures observées pour chaque façade).

4.7.1 Installation d'éclairage artificiel

Les locaux observés sont tous équipés de luminaires sur pieds¹ d'une puissance nominale de 240 W (y c. ballast). La politique initiale de la Fondation du Parc Scientifique, qui gère une partie des bâtiments, était d'allouer un luminaire pour chaque module de bureaux. A l'origine, la dimension des modules était de 16.6 m² (3.50 * 4.75m). La puissance installée était donc de 14.45 W/m².

Cependant, au fur et à mesure des occupations successives, l'aménagement intérieur a été profondément remanié et, notamment, certaines circulations ont été privatisées, ce qui a conduit à modifier la puissance rapportée à la surface. De ce fait, il était difficile de se baser sur les installations existantes pour estimer la consommation annuelle liée à l'éclairage, et ce d'autant plus qu'aucun décompte spécifique de l'électricité spécifique n'est réalisé.

Afin de donner une portée plus générale à cette étude, nous avons donc décidé de décrire une installation « standard » représentative des pratiques actuelles dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Eclairage direct : Plafonnier à grille
- 4 luminaires de type « Channel Office CLD »
- Rendement du luminaire 68%.
- 2 x 35 W fluorescent, efficacité lumineuse : 87 lm/W,
- Ballast électronique, 3W

La puissance totale installée est donc, dans ce cas, de 13.8 W/m² (y-compris ballasts).

La Figure 50 montre la distribution de l'éclairement sur le plan de travail fournie par cette installation.

¹ Lampadaire SUNSET pour 4 lampes compactes fluorescentes 55W FSDH (TC-LEL), rayonnement direct-indirect, réflecteur en tôle perforée, peint par pulvérisation blanc, feuille translucide interne pour une diffusion de la lumière maîtrisée, ballast électronique intégré, avec interrupteur à deux positions, hauteur totale = 1850 mm

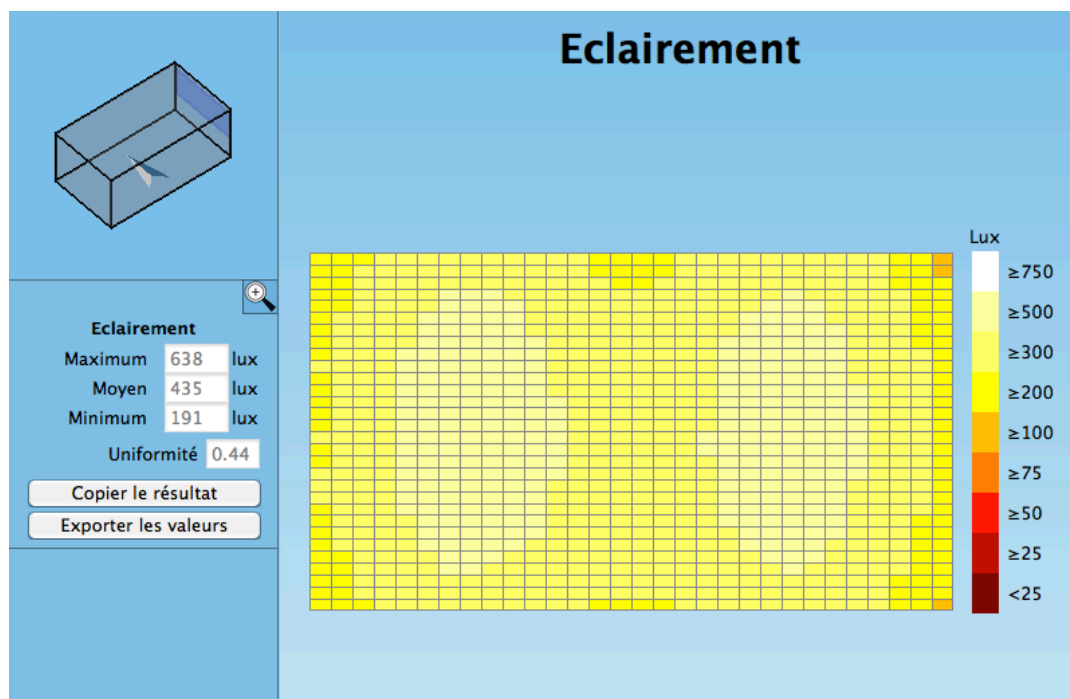


Figure 50 : Niveaux d'éclairement sur le plan de travail (Simulation DIAL+Artificial).

4.7.2 Degrés de protections SIA (Stores)

Nous rappelons ici les définitions données par la SIA concernant les degrés de protection associés aux stores [3]:

- *Degré 1 : Facteur de réflexion des lamelles > 0.6 ; stores avec mécanique permettant l'optimisation de l'éclairage diurne.*
- *Degré 2 : Facteur de réflexion des lamelles de 0.4 à 0.6 ; stores à mécanisme et à réglage simple.*
- *Degré 3 : Facteur de réflexion < à 0.4 ; stores à lamelles avec réglage rudimentaire ou stores en tissus.*

A chacun de ces degrés la Norme fait correspondre un facteur de pondération spécifique (respectivement, 1.0, 1.1 et 1.4) qui vient pondérer la disponibilité de lumière du jour.

L'imbrication de plusieurs facteurs (type de stores (*lamelles* ou *tissus*), facteur de réflexion (*clarté*) et commande (*mécatronique*, *réglage simple* et *réglage rudimentaire*) selon 3 degrés seulement rend l'interprétation ardue.

Pour notre part, nous avons considéré les correspondances suivantes :

- *Degré 1 : Motorisé avec automatisme*
- *Degré 2 : Motorisé sans automatisme*
- *Degré 3 : Store manuel (cas de base ici)*

Dans tous les cas analysés ci-après, nous considérons que les locaux sont potentiellement occupés pendant toute la tranche horaire considérée (7h-18h) et qu'il n'y a pas de détecteur de présence.

4.7.3 Cas 1 : Aucun automatisme

4.7.3.1 Calcul selon SIA 380/4

- Sonde d'éclairement : NON
- Détecteur de présence : NON
- Protection solaire : Degré 3

La Figure 51 montre que, dans ce cas, la consommation est égale à **34.9 kWh/m² par an**.

Nom	Surface [m ²]	Protect. solaire [Degré]	Puissance spécifique [W/m ²]	Consommation [kWh/m ²]	Valeur limite [kWh/m ²]
Bureau Est	22	3	13.8	34.9	39.4
Total	22		13.8	34.9	39.4

Figure 51 : Consommation d'éclairage artificiel selon SIA 380/4 sans aucun automatisme.

4.7.3.2 Simulation selon observations.

(Enclenchement avec un seuil de 150 lux, déclenchement à la pause)

Comme nous l'avons montré au chapitre 5, en l'absence d'automatisme, les seuils d'enclenchement de l'éclairage que nous avons pu observer sont très bas (entre 40 et 150 lux). Par contre, l'observation ne nous a pas permis de tirer des conclusions sur les seuils de déclenchement (dans beaucoup de cas, les utilisateurs vont rarement éteindre les lampes avant de quitter les locaux). Nous examinons ici l'hypothèse selon laquelle les utilisateurs allument les lampes lorsque l'éclairement au centre du local est inférieur à 150 lux, et ne les éteignent au moment où ils quittent leur poste de travail, soit à la pause déjeuner soit en fin de journée. Le Tableau 16 ci-après, qui est basé sur la valeurs d'autonomie présentées au § 4.5.2.1, page 45, montre que cette hypothèse se traduit par des consommations très réduites.

Stores Manuel enclenchement 150 lux	Heures Enclenchement	Consommation (13.8 w/m ²)	Ecart par rapport SIA380/4
Manuel Maxi	1144 h	15.8 kWh/m ² .a	-55%
Manuel Médian	1'773 h	24.5 kWh/m ² .a	-30%
Manuel Mini	2'345 h	32.4 kWh/m ² .a	-9%
SIA 380/4 ; Cas 1		34.9 kWh/m ² .a	

Tableau 16 : Stores manuels, estimation de la consommation annuelle d'électricité liée à l'éclairage avec un seuil d'enclenchement de 150 lux au centre du local et un déclenchement lorsque l'utilisateur quitte son poste de travail.

Le calcul de la SIA 380/4 pour les locaux sans aucun automatisme est **très pessimiste**
 L'écart entre la valeur théorique calculée et la consommation associée aux utilisateurs
 « Médian » est égal à : **+10.4 kWh/m².an**

4.7.4 Cas 2 : Automatisme seulement sur les stores

4.7.4.1 Calcul selon SIA 380/4

- Sonde d'éclairement : NON
- Détecteur de présence : NON
- Protection solaire : Degré 1 (automatisme)

Seul les stores sont automatisés. L'éclairage, quant à lui est entièrement manuel.

La Figure 52 montre que, dans ce cas, la consommation est égale à **29.7 kWh/m²** par an.

Ainsi, selon la Norme actuelle, la mise en œuvre d'un automatisme simplifié sur la gestion des stores entraîne une réduction de la consommation d'éclairage de 15% (comparaison avec le Cas 1).

Nom	Surface	Protect. solaire	Puissance spécifique	Consommation	Valeur limite
	[m ²]	[Degré]	[W/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
Bureau Est	22	1	13.8	29.7	39.4
Total	22		13.8	29.7	39.4

Figure 52 : Consommation d'éclairage artificiel selon SIA 380/4 pour le local muni uniquement de stores automatisés (Degré 1)

4.7.4.2 Simulations selon observations

Nous reprenons ici l'hypothèse présentée au Cas 1 et selon laquelle les utilisateurs allumeraient les lampes lorsque la valeur de l'éclairement au centre du local est inférieure à 150 lux, et ne les éteindraient au moment où ils quittent leur poste de travail, soit à la pause déjeuner soit en fin de journée. Le Tableau ci-dessous montrent les valeurs obtenus avec les deux automatismes sont considérés.

Stores Automatisés	Heures Enclenchement	Consommation (13.8 w/m ²)	Ecart par rapport SIA380/4
Automatisme CONTINUOUS	1144 h	15.8 kWh/m ² .a	-47%
Automatisme RESET	1'287 h	17.8 kWh/m ² .a	-40%
SIA 380/4 ; Cas 2		29.7 kWh/m ² .a	

Tableau 17 : Stores automatisés, estimation de la consommation annuelle d'électricité liée à l'éclairage avec un seuil d'enclenchement/déclenchement de 150 lux au centre du local.

Le calcul de la SIA 380/4 pour l'automatisme sur les stores seul est **Extrêmement pessimiste**.
 L'écart entre la valeur théorique calculée et le résultat obtenu par l'automatisme CONTINUOUS est égal à : **+13.9 kWh/m².an**

4.7.5 Cas 3 : Automatisation sur l'éclairage : Auto ON-OFF

4.7.5.1 Calcul selon SIA 380/4

- Sonde d'éclairement : Commutation Enclenché/Déclenché
- Détecteur de présence : NON
- Protection solaire : Degré 3

La Figure 53 montre que, dans ce cas, la consommation est égale à **27.6 kWh/m²** par an.

Ainsi, la mise en œuvre d'un automate simplifié sur la commande de l'éclairage permet, selon la Norme, de réduire de près de 21% la consommation d'éclairage (en comparaison avec le Cas 1 (34.9 kWh/m² par an)).

Nom	Surface [m ²]	Protect. solaire [Degré]	Puissance spécifique [W/m ²]	Consommation [kWh/m ²]	Valeur limite [kWh/m ²]
Bureau Est	22	3	13.8	27.6	39.4
Total	22		13.8	27.6	39.4

Figure 53 : Consommation d'éclairage artificiel selon SIA 380/4 pour le local muni d'une sonde d'éclairement « Enclenché déclenché » et de stores manuels.

4.7.5.2 Simulations selon observations

Si nous retenons l'hypothèse théorique selon laquelle un automate ON-OFF enclenche l'éclairage dès que la valeur de l'éclairement au centre du local est inférieure à 500 lux pendant les heures d'utilisation des locaux (7h-18h), la consommation d'énergie peut être approchée en appelant la puissance installée pendant les heures d'enclenchement, soit le complément des heures d'autonomie à 500 lux ($H_{Auto500}$).

Le Tableau 18 montre la moyenne pondérée des valeurs d'autonomies obtenue au centre du local sur la totalité des locaux observés. Il reprend les valeurs mentionnées dans le Tableau 11, p. 41.

Moyenne pondérée 3 façades	Heures Enclenchement	Consommation (13.8 w/m ²)	Ecart par rapport SIA380/4
Manuel Maxi	1'762 h	24.3 kWh/m ² .a	-6%
Manuel Médian	2'412 h	33.3 kWh/m ² .a	+29%
Manuel Mini	2'765 h	38.2 kWh/m ² .a	+48%
SIA 380/4 ; Cas 3		27.6 kWh/m ² .a	

Tableau 18 : Stores manuels, estimation de la consommation annuelle d'électricité liée à l'éclairage avec un seuil d'enclenchement/déclenchement de 500 lux au centre du local.

Le calcul de la SIA 380/4 pour l'automatisme ON-OFF sur l'éclairage plutôt **optimiste**.

L'écart entre la valeur théorique calculée et le résultat obtenu par l'utilisateur « Médian », est égal à :

-5.7 kWh/m².an

4.7.6 Cas 4 : Automatisation sur l'éclairage ON-OFF et sur les stores

4.7.6.1 Calcul selon SIA 380/4

- Sonde d'éclairement : Commutation Enclenché/Déclenché
- Détecteur de présence : NON
- Protection solaire : Degré 1 (automatisme)

La Figure 54 montre que, dans ce cas, la consommation est égale à **24.5 kWh/m²** par an.

Nom	Surface [m ²]	Protect. solaire [Degré]	Puissance spécifique [W/m ²]	Consommation [kWh/m ²]	Valeur limite [kWh/m ²]
Bureau Est	22	1	13.8	24.5	39.4
Total	22		13.8	24.5	39.4

Figure 54 : Consommation d'éclairage artificiel selon SIA 380/4 pour le local muni d'une sonde d'éclairement « Enclenché/déclenché » et de stores automatisés (Degré 1).

Dans ce cas, la Norme considère que la mise en œuvre d'un automatisme sur la commande des stores entraîne une réduction mesurée de la consommation d'éclairage (24.5 kWh/m² contre 27.6 kWh/m² pour le Cas 3 soit ≈ 11%).

4.7.6.2 Simulation selon observations

Le Tableau 19 montre les valeurs de consommation estimées avec les deux automatismes que nous avons testés (les valeurs reprennent la seconde partie du Tableau 11, page 41).

Moyenne pondérée 3 façades	Heures Enclenchement	Consommation (13.8 w/m ²)	Ecart SIA
Automatisme CONTINUOUS	1'930 h	26.6 kWh/m ² .a	+9%
Automatisme RESET	2'010 h	27.7 kWh/m ² .a	+13%
SIA 380/4 ; Cas 4		24.5 kWh/m ² .a	

Tableau 19 : Stores automatisés, estimation de la consommation annuelle d'électricité liée à l'éclairage avec un seuil d'enclenchement/déclenchement de 500 lux au centre du local (les valeurs sont ici pondérées par le nombre d'ouvertures observées pour chaque façade).

Le calcul de la SIA 380/4 pour la combinaison Automatisme ON/OFF sur l'éclairage + Stores automatisés est **assez proche de l'observation**.

L'écart entre la valeur théorique calculée et le résultat obtenu avec l'automatisme CONTINUOUS est égal à : **-2.1 kWh/m².an**

4.7.7 Cas 5 : Automatisation sur l'éclairage : Auto-OFF

4.7.7.1 Calcul selon SIA 380/4

- Sonde d'éclairement : Arrêt automatique /enclenchement manuel
- Détecteur de présence : NON
- Protection solaire : Degré 3

Dans ce cas, l'automatisme se contente d'éteindre la lumière lorsque l'éclairement atteint 500 lux, sans le rallumer par la suite. La Figure 55 montre que, dans ce cas, la consommation est égale à **25.8 kWh/m²** par an. Par rapport à la situation initiale (Cas 1 : 34.9 kWh/m²), la réduction de la consommation d'énergie atteint 26%.

Nom	Surface [m ²]	Protect. solaire [Degré]	Puissance spécifique [W/m ²]	Consommation [kWh/m ²]	Valeur limite [kWh/m ²]
Bureau Est	22	3	13.8	25.8	39.4
Total	22		13.8	25.8	39.4

Figure 55 : Consommation d'éclairage artificiel selon SIA 380/4 pour le local muni d'une sonde d'éclairement « Auto-OFF » et de stores manuels.

4.7.7.2 Simulations selon observations

Nous examinons ici l'hypothèse théorique selon laquelle les lampes sont enclenchées par les utilisateurs lorsque l'éclairement au centre du local est inférieur à 150 lux (cf. observations faites au **chapitre 4.3**) et déclenchées automatiquement dès que l'éclairement dépasse 500 lux (la période d'analyse correspond à la tranche horaire 7h-18h). Les profils correspondant aux 3 façades observées peuvent être consultés en annexe au **§ 8.1, page 81**

Le Tableau 20 ci-après montre la moyenne pondérée des valeurs d'autonomie obtenues au centre du local sur la totalité des locaux observés.

Moyenne pondérée 3 façades	Heures Enclenchement	Consommation (13.8 w/m ²)	Ecart par rapport SIA380/4
Manuel Maxi	904 h	12.5 kWh/m ² .a	-52%
Manuel Médian	1'611 h	22.2 kWh/m ² .a	-14%
Manuel Mini	2'281 h	31.5 kWh/m ² .a	+22%
SIA 380/4 ; Cas 5		25.8 kWh/m ² .a	

Tableau 20 : Stores manuels, estimation de la consommation annuelle liée à l'éclairage avec un seuil d'enclenchement à 150 lux et de déclenchement à 500 lux au centre du local.

Le calcul de la SIA 380/4 pour l'automatisme Auto-OFF sur l'éclairage est **assez proche de l'observation**.

L'écart entre la valeur théorique calculée et le résultat obtenu par l'utilisateur « Médian », est égal à : **+3.6 kWh/m².an**

4.7.8 Cas 6 : Automatisation sur l'éclairage Auto-OFF et sur les stores

4.7.8.1 Calcul selon SIA 380/4

- Sonde d'éclairement : Arrêt automatique et enclenchement manuel
- Détecteur de présence : NON
- Protection solaire : Degré 1 (automatisme)

La Figure 54 montre que, dans ce cas, la consommation est égale à **23.2 kWh/m²** par an.

Nom	Surface [m ²]	Protect. solaire [Degré]	Puissance spécifique [W/m ²]	Consommation [kWh/m ²]	Valeur limite [kWh/m ²]
Bureau Est	22	1	13.8	23.2	39.4
Total	22		13.8	23.2	39.4

Figure 56 : Consommation d'éclairage artificiel selon SIA 380/4 pour le local muni d'une sonde d'éclairement « Enclenché/déclenché » et de stores automatisés (Degré 1).

La comparaison avec le cas 5 exposé ci-dessus montre que la Norme considère que la mise en œuvre d'un automatisme sur la commande des stores entraîne une faible réduction supplémentaire de la consommation d'éclairage (23.2 kWh/m² contre 25.8 kWh/m², soit environ 10%).

4.7.8.2 Simulations selon observations

Le tableau ci-dessous montre les valeurs de consommation estimées avec les deux automatismes que nous avons testés (les valeurs reposent sur les profils d'autonomies exposés en annexe (cf. § 8.1, page 81).

Moyenne pondérée 3 façades	Heures Enclenchement	Consommation (13.8 w/m ²)	Ecart SIA
Automatisme CONTINUOUS	897 h	12.4 kWh/m ² .a	-49%
Automatisme RESET	1062 h	14.7 kWh/m ² .a	-40%
SIA 380/4 ; Cas 6		23.2 kWh/m ² .a	

Tableau 21 : Stores automatisés, estimation de la consommation annuelle d'électricité liée à l'éclairage avec un seuil d'enclenchement/déclenchement de 500 lux au centre du local.

Le calcul de la SIA 380/4 pour la combinaison Auto-OFF sur l'éclairage + Stores automatisés est **très pessimiste**.

L'écart entre la valeur théorique calculée et le résultat obtenu avec l'automatisme CONTINUOUS est égal à: **+10.8 kWh/m².an**

4.7.9 Cas 7 : Automatisation sur l'éclairage : Dimming sans stand-by

4.7.9.1 Calcul selon SIA 380/4

- Sonde d'éclairage : Régulation à luminosité constante (sans mise en stand-by)
- Détecteur de présence : NON
- Protection solaire : Degré 3

Dans ce cas, l'automatisme complète l'éclairage intérieur de façon à ne jamais être au dessous de 500 lux (la puissance spécifique est appelée partiellement en fonction du complément d'éclairage à fournir. Par exemple, si l'éclairage intérieur atteint 400 lux, le complément à apporter est de 100 lux, soit 20% de l'éclairage requis. La puissance appelée est donc de 20% dans ce cas. La Figure 57 montre que, dans ce cas, la consommation est égale à **27.6 kWh/m²** par an. Cet automatisme présente les mêmes performances que le Cas 3 présenté ci-dessus. (Auto ON-OFF). Par rapport à la situation initiale (Cas 1), la réduction de la consommation d'énergie atteint 21%.

Nom	Surface [m ²]	Protect. solaire [Degré]	Puissance spécifique [W/m ²]	Consommation [kWh/m ²]	Valeur limite [kWh/m ²]
Bureau Est	22	3	13.8	27.6	39.4
Total	22		13.8	27.6	39.4

Figure 57 : Consommation d'éclairage artificiel selon SIA 380/4 pour le local muni d'une sonde d'éclairage « Auto-OFF » et de stores manuels.

4.7.9.2 Simulations selon observations

Les profils correspondant aux 3 façades observées peuvent être consultés en annexe au § 8.2, page 83. Le Tableau 22 ci-après montre la moyenne pondérée des valeurs d'autonomies obtenue au centre du local sur la totalité des locaux observés.

Moyenne pondérée 3 façades	Heures Enclenchement	Consommation (13.8 w/m ²)	Ecart par rapport SIA380/4
Manuel Maxi	972 h	13.4 kWh/m ² .a	-51%
Manuel Médian	1'487 h	20.5 kWh/m ² .a	-26%
Manuel Mini	2'116 h	29.2 kWh/m ² .a	+6%
SIA 380/4 ; Cas 7		27.6 kWh/m ² .a	

Tableau 22 : Stores manuels, estimation de la consommation annuelle liée à l'éclairage avec un seuil d'enclenchement à 150 lux et de déclenchement à 500 lux au centre du local.

Le calcul de la SIA 380/4 pour la régulation en continu de l'éclairage est **nettement pessimiste**. L'écart entre la valeur théorique calculée et le résultat obtenu par l'utilisateur « Médian », est égal à : **+7.1 kWh/m².an**

4.7.10 Cas 8 : Automatisation sur l'éclairage (Dimming) et sur les stores

4.7.10.1 Calcul selon SIA 380/4

- Sonde d'éclairement : Régulation à luminosité constante (sans mise en stand-by)
- Détecteur de présence : NON
- Protection solaire : Degré 1 (automatisme)

La Figure 54 montre que, dans ce cas, la consommation est égale à 24.5 kWh/m² par an.

Nom	Surface	Protect. solaire	Puissance spécifique	Consommation	Valeur limite
	[m ²]	[Degré]	[W/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
Bureau Est	22	1	13.8	24.5	39.4
Total	22		13.8	24.5	39.4

Figure 58 : Consommation d'éclairage artificiel selon SIA 380/4 pour le local muni d'une sonde d'éclairement « Enclenché/déclenché » et de stores automatisés (Degré 1).

La comparaison avec le cas 7 exposé ci-dessus montre que la Norme considère que la mise en œuvre d'un automatisme sur la commande des stores entraîne une réduction mesurée de la consommation d'éclairage (24.5 kWh/m² contre 27.6 kWh/m², soit ~11%).

4.7.10.2 Simulations selon observations

Le tableau ci-dessous montre les valeurs de consommation estimées avec les deux automatismes que nous avons testés (les valeurs reposent sur les profils d'autonomies exposés en annexe (cf. § 8.2, page 83).

Moyenne pondérée 3 façades	Heures Enclenchement	Consommation (13.8 w/m ²)	Ecart SIA
Automatisme CONTINUOUS	915 h	12.6 kWh/m ² .a	-48%
Automatisme RESET	1058 h	14.6 kWh/m ² .a	+40%
SIA 380/4 ; Cas 8		24.5 kWh/m ² .a	

Tableau 23 : Stores automatisés, estimation de la consommation annuelle d'électricité liée à l'éclairage avec un seuil d'enclenchement/déclenchement de 500 lux au centre du local (les valeurs sont ici pondérées par le nombre d'ouvertures observées pour chaque façade).

Le calcul de la SIA 380/4 pour la combinaison Régulation en continu de l'éclairage + Stores automatisés est **extrêmement pessimiste**.

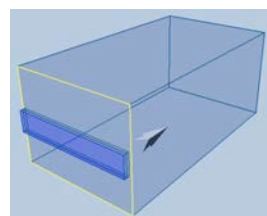
L'écart entre la valeur théorique calculée et le résultat obtenu avec l'automatisme CONTINUOUS est égal à : **+11.9 kWh/m².an**

4.7.11 Cas 9 : Ouverture effective modifiée

(Ouverture « équivalente » tenant compte de l'occultation moyenne des stores)

- Sonde d'éclairage en continu : NON
- Détecteur de présence : NON
- Protection solaire : Degré 3

Si l'on reprend l'information exposée au § 4.1.3, page 22 et que l'on simule le cas d'un local dont la hauteur vitrée effective est amputée de 57% (pourcentage d'occultation moyen observé sur l'ensemble des façades), comme le montre l'axonométrie ci-contre, le calcul SIA 380/4 donne une consommation estimée de 39.6 kWh/m² (cf. Figure 59).



Nom	Surface [m ²]	Protect. solaire [Degré]	Puissance spécifique [W/m ²]	Consommation [kWh/m ²]	Valeur limite [kWh/m ²]
Bureau Sud1 43 pourcent	22	2	13.8	39.6	46.6
Total	22		13.8	39.6	46.6

Figure 59 : Consommation d'éclairage artificiel selon SIA 380/4 pour le local sans aucun automatisme et avec une hauteur vitrée effective réduite de 57%.

Au delà de cette logique augmentation de la consommation, nous aimerions souligner le fait que la valeur *Limite* a été repoussée : 46.6 kWh/m² (Cas 9), contre 39.4 kWh/m² initialement (Cas 1). Il en est de même pour les valeurs Cible et Minergie, qui ont été repoussées (respectivement 25.7 contre 16.5 initialement pour les valeurs Cible et 30.9 contre 22.2 initialement pour les valeurs Minergie)

Concrètement, dans ce cas, la performance du Cas 9 est plus proche de la valeur Minergie, ce qui est pour le moins illogique !

Ceci traduit le fait que la Norme actuelle autorise une consommation plus élevée si le local est « *mal conçu* » du point de vue de la lumière naturelle.

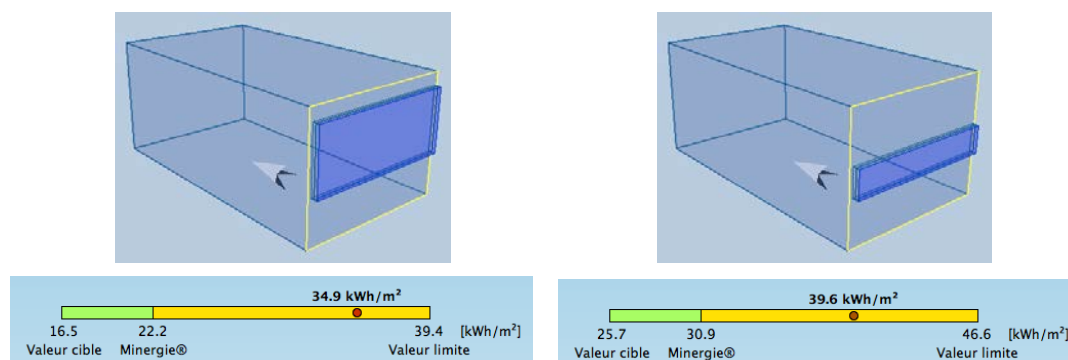


Figure 60 : Influence de la hauteur vitrée effective selon la norme 380/4.

Axonométrie et performance du Cas 1

Axonométrie et performance du Cas 9

4.7.12 Synthèse sur le calcul de la consommation d'énergie

La Figure 61 et le Tableau 24 ci-dessous résument les comparaisons effectuées ci-dessus entre les valeurs calculées par la norme SIA-380/4 et les valeurs simulées d'après les observations effectuées (valeurs médianes).

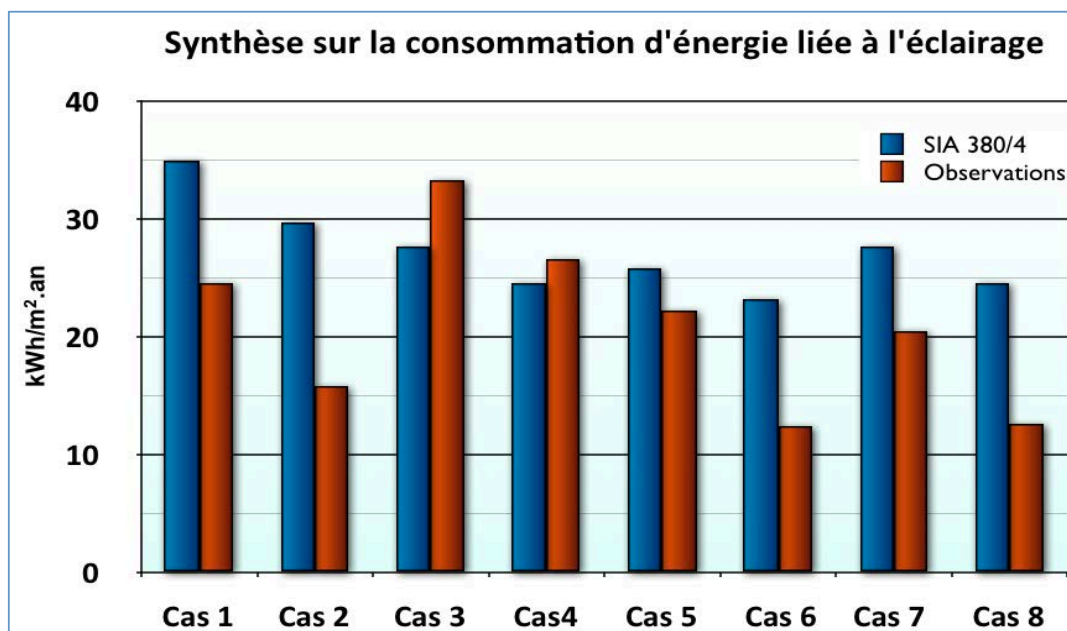


Figure 61 : Synthèse des valeurs de consommation d'éclairage : comparaison entre les valeurs calculées (SIA-380/4) et les valeurs issues de l'observation (simulations annuelles).

	Eclairage artificiel	Stores	SIA	Observation
Cas 1	Manuel	Manuel	34.9	24.5
Cas 2	Manuel	Automatisé	29.7	15.8
Cas 3	Auto Enclenché / Déclenché	Manuel	27.6	33.3
Cas 4	Auto Enclenché / Déclenché	Automatisé	24.5	26.6
Cas 5	Auto OFF	Manuel	25.8	22.2
Cas 6	Auto OFF	Automatisé	23.2	12.4
Cas 7	Dimming sans mise en stand-by	Manuel	27.6	20.5
Cas 8	Dimming sans mise en stand-by	Automatisé	24.5	12.6

Tableau 24 : Synthèse des scénarios analysés et des consommations d'éclairage associées.

On constate qu'à l'exception des Cas 3 et 4, le calcul selon la Norme donne des valeurs de consommation supérieures à celles simulées (écart est parfois important, cf. cas 2, 6 et 8).

Le mode de calcul de la Norme est donc en général « **Pessimiste** » à « **Très pessimiste** », sauf dans le cas de l'automatisme « Enclenché/déclenché ».

4.8 Calculs selon la méthode d'autonomie en lumière diffuse

Les éléments présentés au paragraphe précédent reposent sur l'analyse d'un très grand nombre de données (un an de mesures sur 125 ouvertures). Pour chaque local analysé, une simulation complexe a dû être réalisée, nécessitant un temps de calcul significatif (> 2h).

Dans le cadre d'un projet de construction ou de rénovation d'un bâtiment, il est important de donner rapidement au concepteur des indications sur la performance de son design. De nombreux labels de performance énergétiques (BREAM, LEED, Certivéa, etc.) ont retenu le facteur de lumière du jour comme indicateur.

4.8.1 La notion de Facteur de Lumière du jour (FLJ)

Pour mémoire, le facteur de lumière du jour donne le ratio entre la lumière diffuse disponible à l'extérieur et l'éclairement intérieur en un point donné d'un local quelconque (Figure 62). Le calcul est effectué avec un ciel couvert normalisé (CIE Overcast Sky) et le temps de simulation est relativement court (quelques secondes à quelques minutes). Il permet donc de comparer rapidement différentes variantes d'un même local et constitue en ce sens un outil intéressant pour les concepteurs et les autorités de contrôle.

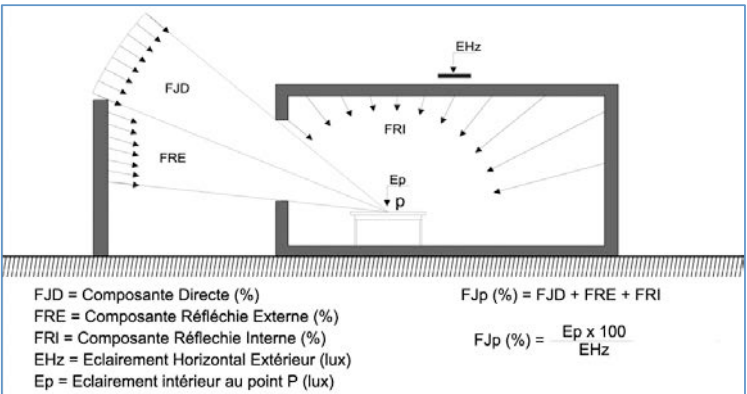


Figure 62 : Facteur de lumière du jour : schéma explicatif & définition.

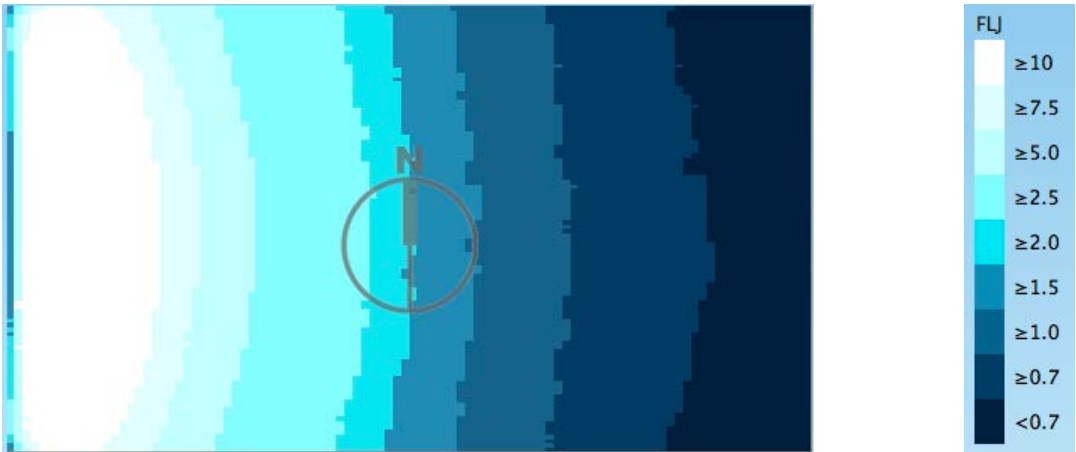


Figure 63 : Facteurs de lumière du jour pour le local de référence (ici ouverture à l'Ouest).

Cette méthode présente toutefois les inconvénients suivants :

- Les résultats ne sont pas sensibles à l'orientation : pas de différence entre des locaux identiques orientés au Nord, au Sud, à l'Est ou à l'Ouest.
- Les résultats ne sont pas sensibles à la localisation : pas de différence entre des locaux identiques situés à Oslo, à Berne ou à Madrid.
- Les résultats sont relativement peu intuitifs pour un non expert : Ainsi, par exemple, selon le référentiel Certivéa [6], pour atteindre le niveau « Performant »,
« Il est demandé d'obtenir un facteur de lumière du jour minimum (FLJ) dans la zone de premier rang :
 - $FLJ \geq 2\%$ pour 80% de la surface de la zone de premier rang, dans 80% des locaux concernés (en surface)
 - $FLJ \geq 1,5\%$ pour 80% de la surface de la zone de premier rang, dans les 20% de locaux concernés restants (en surface)

4.8.2 La notion d'Autonomie en Lumière Diffuse

Afin de palier à ces inconvénients, le projet DIAL-Europe [4] financé par la Confédération, a proposé dès 2002 d'utiliser les valeurs de FLJ pour calculer **l'autonomie en lumière diffuse** dans un local donné.

Le principe est le suivant : pour chaque heure de l'année, la valeur de l'éclairement diffus extérieur sur le plan horizontal ($ExtH_{dif}$) est extraite du fichier météorologique correspondant à la localisation du local (données Météosuisse). Le classement de ces valeurs permet de connaître la distribution cumulée de l'éclairement diffus à l'échelle annuelle. Il est alors possible de connaître le pourcentage du temps pendant lequel l'éclairement extérieur atteint ou dépasse une certaine valeur. (cf. Figure 64).

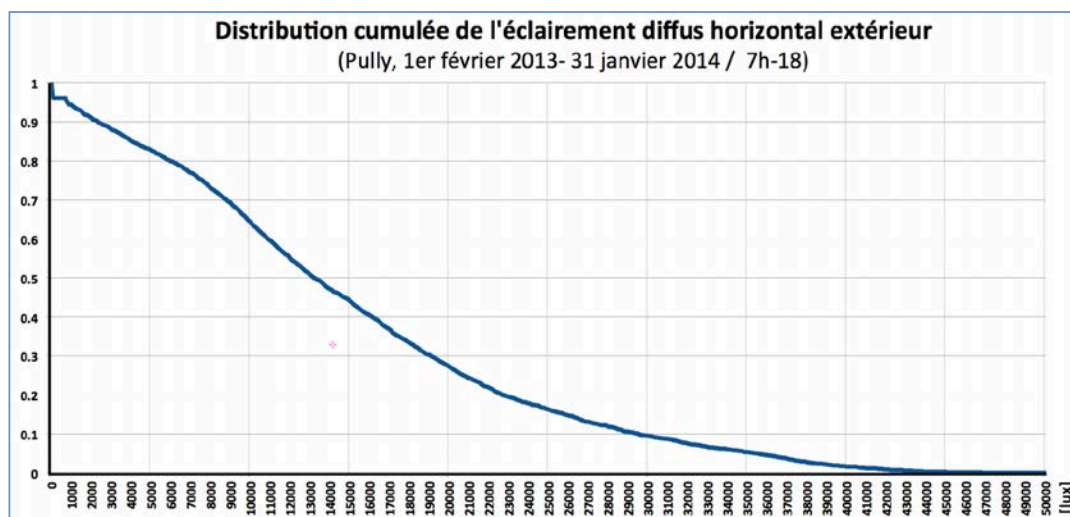


Figure 64 : Distribution cumulée de l'éclairement diffus horizontal extérieur pour la période comprise entre le 1^{er} février 2013 et le 31 janvier 2014 (données Météosuisse pour la station de Pully, tranche horaire 7h-18h).

A partir de cette connaissance de la disponibilité en lumière à l'extérieur, il est possible d'estimer la couverture des besoins en éclairage intérieur en fonction du facteur de lumière du jour et du niveau d'éclairement requis.

Considérons par exemple un local de référence situé à Lausanne et muni d'une ouverture horizontale en toiture, et dont l'éclairement requis au centre serait de 500 lux :

- Si le facteur de lumière du jour en ce point est égal à 4%, alors, l'éclairement intérieur atteindra 500 lux dès que l'éclairement diffus extérieur ($ExtH_{diff}$) sera supérieur ou égal à 12'500 lux ($12'500 \times 0.04 = 500$).
- Dans ce cas, la Figure 65 montre la probabilité que $ExtH_{Diff}$ dépasse 12'500 lux est de 0.53 (*Ouverture horizontale*). Nous en déduisons donc que la couverture annuelle des besoins en lumière diffuse sera égale à 53% pour la tranche horaire concernée.

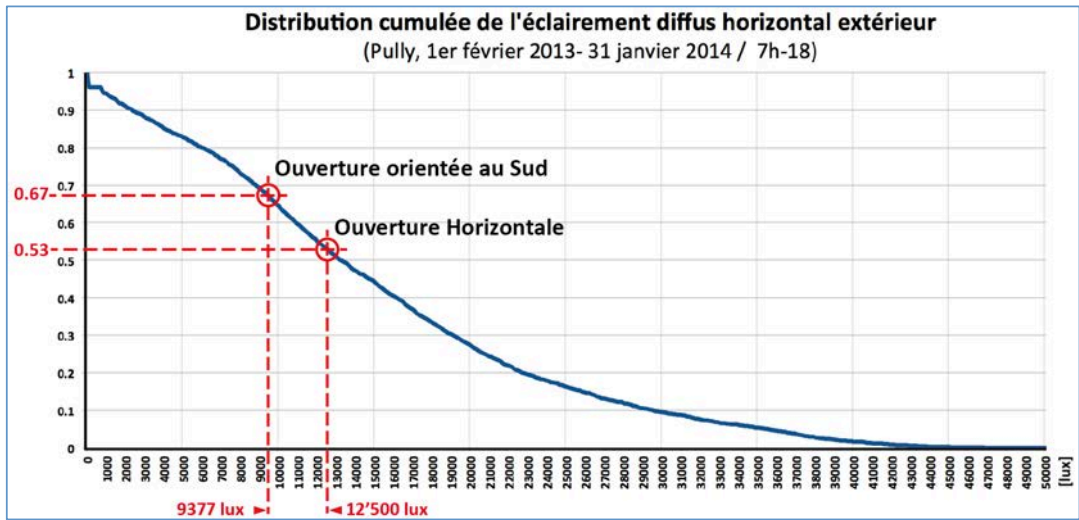


Figure 65 : Valeurs de l'éclairement diffus horizontal extérieur nécessaire pour obtenir un éclairement de 500 lux en un point dont le facteur de lumière du jour est de 4%.

En ce qui concerne les ouvertures en façades, des facteurs d'orientation doivent être appliqués afin de tenir compte de la dissymétrie de la distribution des luminances de la voûte céleste (sous nos latitudes, la luminance moyenne du ciel est, par exemple, plus élevée au Sud qu'au Nord ou encore qu'au zénith). Le Tableau 25 montre les facteurs d'orientation applicables pour la période et le lieu de cette étude.

Orientations	Sud	Est	Nord	Ouest
Facteurs d'orientation	1.333	1.138	0.957	1.128

Tableau 25 : Facteurs d'orientations calculés pour le climat de Pully (période du 1^{er} février 2013 au 31 janvier 2014, tranche horaire 7h-18h).

Si, pour le même local de référence, l'ouverture est orientée au Sud, l'éclairement diffus extérieur ($ExtH_{diff}$) nécessaire pour atteindre les 500 lux sera pondéré par le facteur d'orientation (ici $12'500/1.333 = 9'377$ lux). La probabilité de dépasser ce niveau sera alors de 0.67 (cf. Figure 65, « *Ouverture orientée au Sud* »). Pour ce local, l'autonomie en lumière diffuse pour un point présentant un FLJ de 4% sera donc de 67% (valeur moyenne annuelle, entre 7h et 18h).

Ce calcul simplifié, décrit dans la revue « Les Techniques de l'Ingénieur » [5] est disponible dans la version commerciale du logiciel DIAL+Lighting. Outre le temps de calcul très réduit de

cette méthode on mentionnera aussi le fait qu'elle permet de présenter les résultats sous une forme graphique intuitive (mapping sur les différentes surfaces, Figure 66).

Nous avons donc calculé les valeurs d'autonomie en lumière diffuse obtenues avec ce logiciel pour chacune des orientations du local (cf. Figure 66). Les points 1 à 5 qui sont indiqués sur les 3 locaux correspondent aux points utilisés dans les simulations présentées dans les chapitres précédents (cf. Figure 23, **page 25**).

4.8.3 Application aux locaux observés dans le cadre de cette étude

Autonomie en lumière diffuse pour un éclairage requis de 500 lux

La Figure 66 ci-dessous montre les valeurs d'autonomie en lumière diffuse calculées pour les 3 orientations observées. On constate que les résultats sont sensiblement identiques pour les orientations Ouest et Est, ce qui reflète la similarité des facteurs d'orientation pour ces deux façades (cf. Tableau 25). Le local orienté au Sud présente quant à lui des valeurs légèrement supérieures.

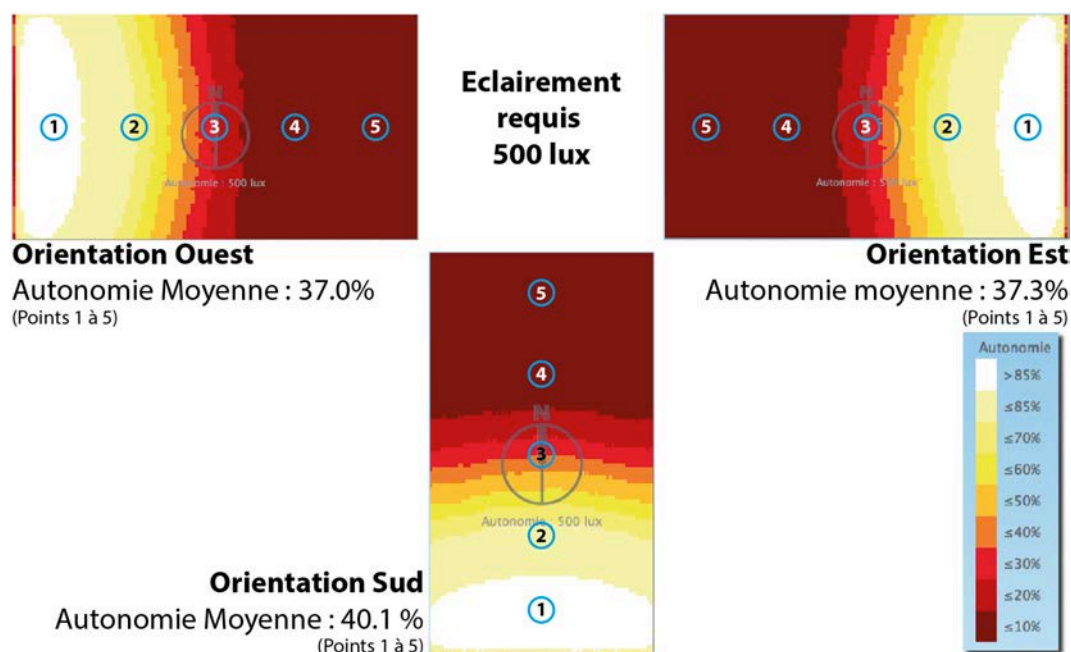


Figure 66 : Autonomie en lumière diffuse pour un éclairage requis de 500 lux sur le plan de travail (simulation DIAL+Lighting). Les valeurs moyennes mentionnées ici sont établies sur les points de 1 à 5.

Eclairage requis 500 lux	OUEST	SUD	EST
Autonomie utilisateur Maxi	33.0	49.4	33
Autonomie utilisateur Médian	3	22.0	22
Autonomie utilisateur Mini	1	4.0	7
Autonomie avec automatisme CONTINUOUS	25	41.8	32
Autonomie avec automatisme RESET	25	36.2	27
Autonomie en Lumière Diffuse (DIAL+)	37	40.1	37.3

Tableau 26 : Valeurs moyennes de l'autonomie pour un éclairage de 500 lux, selon les différentes méthodes utilisées (%).

Les valeurs moyennes d'autonomie qui sont indiquées pour chacune des 3 orientations considérées, correspondent à la moyenne des points 1 à 5.

Si l'on compare ces valeurs avec les résultats obtenus précédemment, on constate que celles-ci sont relativement proches de la valeur obtenue avec l'automatisme « CONTINUOUS » pour l'orientation Sud (40.1 contre 41.8).

Pour les façades Est et Ouest le calcul est nettement optimiste.

Estimation de la consommation d'énergie sur la base de l'autonomie en lumière diffuse

Si l'on connaît la valeur moyenne de l'autonomie en lumière diffuse du local, il est alors possible d'en déduire le temps pendant lequel l'éclairage artificiel sera éteint et, par conséquent, de calculer le nombre d'heures à pleine charge.

Considérons par exemple le local orienté au Sud pour lequel l'autonomie atteint 40.1% (éclairage 500 lux, cf. Tableau 26). Le nombre d'heures annuelles pendant lequel le recours à l'éclairage artificiel ne sera pas nécessaire peut être calculé de la façon suivante :

$$(2'860 * 41)/100 = 1'173 \text{ heures par an}$$

En conséquence le nombre d'heures d'enclenchement s'élève à :

$$2'860 - 1'173 = 1'687 \text{ heures par an}$$

Si l'on appelle la puissance spécifique du local (soit 13.8 w/m², cf. § 4.7.1, page 56), la consommation peut être approchée comme suit :

$$1'687 * 13.8 = 23.3 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$$

L'application de cette méthode de calcul aux trois orientations donne les valeurs exposées dans le Tableau 27 ci-après.

Eclairage requis 500 lux	OUEST	SUD	EST	Moyenne pondérée
Autonomie en Lumière Diffuse (DIAL+)	37%	40.1%	37.3%	38.4%
Consommation d'électricité liée à l'éclairage (kWh/m ² .an)	28.8	23.3	28.7	26.5

Tableau 27 : Consommation d'électricité liée à l'éclairage en fonction de l'autonomie en lumière diffuse et de l'orientation du local.

Ces valeurs sont à comparer avec celles obtenues selon le calcul de la norme SIA 380/4 et exposées précédemment (cf. Cas 6, § 4.7.8.1, page 63), soit une valeur de 23.2kWh/m².

En ce qui concerne les valeurs cibles à atteindre, on pourra utilement se référer à l'article présenté lors de la conférence CISBAT'13 [7].

4.8.4 Synthèse sur le calcul de la consommation d'énergie selon l'autonomie en lumière diffuse

- On constate que la valeur de consommation issue du calcul de l'autonomie en lumière diffuse pour l'orientation Sud (500 lux), est très proche de la valeur donnée par la Norme (qui elle ne prend pas en compte l'orientation des ouvertures).
- Compte-tenu de ce qui précède, nous pensons que la valeur moyenne de **l'autonomie en lumière diffuse** pourrait constituer un outil *raisonnable* pour caractériser rapidement le potentiel maximal d'un local orienté au Sud et équipé de protections solaires automatisées et d'une commande simple de l'éclairage artificiel (ON-OFF).
- Pour autres orientations un travail d'adaptation est sans doute nécessaire.

5 Discussion / évaluation des résultats / enseignements

5.1 Constats sur les protections solaires et leur utilisation

Cette étude montre clairement que l'automatisation des stores ouvre un potentiel important d'utilisation de la lumière du jour.

5.1.1 Mouvements de stores

- Le nombre de mouvements des stores est extrêmement faible (1.74 mouvements par semaine en moyenne, **cf. § 4.1.1, page 17**).

Seulement 12% des utilisateurs modifient la position de leur store chaque jour alors que 41% font moins de 1 mouvement par semaine.

5.1.2 Pourcentage d'occultation

- Le pourcentage d'occultation moyen des ouvertures est très élevé (jusqu'à près de 75% en moyenne dans le cas de la façade Sud, **cf. § 4.1.3, page 22**).

Certains utilisateurs laissent leurs stores ouverts pendant la majorité du temps tandis que d'autres au contraire, les laissent fermés pendant la plus grande partie du temps.

La dispersion entre ces deux comportements est très grande et conduit à de gros écarts en ce qui concerne la couverture des besoins lumineux.

5.1.3 Variations en fonction de l'orientation

- On constate des variations sensibles en fonction de l'orientation. Ceci a des répercussions importantes sur l'utilisation effective de la lumière du jour et sur la consommation en éclairage artificiel.
- La Façade Ouest est celle qui présente la dispersion la plus élevée (**cf. § 4.2.3, page 28**). Les mouvements de réglage de l'inclinaison des lames sont aussi nettement plus nombreux sur cette orientation (**cf. 4.1.2.3, page 22**).

Nous expliquons ceci par le fait que lorsque le soleil frappe cette façade, il est dans un mouvement descendant et que le blocage des rayons nécessite des adaptations successives (à l'inverse, sur la façade Est, un réglage ponctuel effectué à 9h du matin permettra de bloquer les rayons solaires durant toute la matinée).

- La dispersion des résultats est moins forte sur la façade Est.
Ceci est sans doute dû au fait que les stores sont motorisés sur ce bâtiment. L'usage des stores est ainsi facilité ce qui explique probablement le fait que le pourcentage d'occultation soit moins élevé sur cette façade (35% en moyenne sur l'année, **cf. § 4.1.3, page 22**).

5.1.4 Influence de la clarté des lames

- L'influence de la clarté des lames reste modérée du point de vue quantitatif (cf. § 4.6.1, page 46)

On notera cependant que le fait d'utiliser des lames sombres augmente l'effet de barrière visuelle avec l'extérieur et pénalise le confort visuel des utilisateurs.

5.1.5 Stores en tissus

- Les stores en tissus, à condition de ne pas être opaques, présentent un potentiel proche des stores à lames (cf. § 4.6.2, page 49).

5.1.6 Vitrages à teinte variable

- Les vitrages à teinte variable électroniquement présentent un potentiel proche des stores à lames, lorsque le contrôle de la teinte se fait par zones (cf. § 4.6.3, page 52).

La conservation de la vision vers l'extérieur et la transition progressive de l'état des vitrages constituent un avantage certain pour le confort des utilisateurs.

5.1.7 Potentiel de gains lié à l'automatisation des stores

- Le potentiel de gain lié à l'automatisation des stores est :
 - Très élevé pour les deux premiers points du local,
 - Élevé au centre du local,
 - Modéré en fond de pièce (proche de la médiane).
- L'automatisme CONTINUOUS (adaptation horaire de la position du store vers le haut ou vers le bas) permet de gagner plusieurs centaines d'heures d'autonomie en éclairage naturel. La réduction de la consommation d'électricité liée à l'éclairage peut aller jusqu'à 35% pour un usage standard (tel que décrit au § 4.5.2, page 42 et suivantes).
- L'automatisme RESET est légèrement moins performant au Sud et à l'Est que l'automatisme CONTINUOUS, et équivalent à l'Ouest. En moyenne, l'écart avec l'automatisme CONTINUOUS est de 10% environ.

Cet automatisme présente toutefois l'avantage d'être très peu intrusif et devrait donc être mieux accepté par les utilisateurs.

6 Conclusions et perspectives, étapes ultérieures

6.1 Recommandations pour l'actualisation de la norme 380/4

6.1.1 Constats issus de cette étude

Aucun Automatisme

En l'absence d'automatisme, il apparaît que le calcul de **la Norme SIA est très pessimiste**. Les observations faites au **chapitre 4.3** montrent en effet que les utilisateurs n'enclenchent l'éclairage que lorsque le niveau d'éclairement est très bas ce qui réduit la consommation effective sans automatisme. Un réexamen de la Norme devrait tenir compte de cet état de fait et réduire sensiblement la prévision de consommation sans automatisme (-20% à -35%)

Automatisme sur l'éclairage seul.

Ce travail suggère que la mise en œuvre d'automatismes Enclenché/Déclenché sur l'éclairage artificiel, est probablement contre-productive dans la mesure où elle tend à augmenter sensiblement le nombre d'heures à pleine charge. A fortiori, si les stores ne sont pas automatisés, la durée d'enclenchement sera nettement augmentée du fait de la réduction des niveaux d'éclairement intérieurs liés à la mauvaise gestion manuelle des stores.

L'automatisme sur l'éclairage seul peut toujours être recommandé mais en **priviliégiant les automatismes de déclenchement** qui sont une source importante d'économie d'énergie.

Les automatismes sur l'éclairage qui incluent une **commande d'enclenchement** devaient être réservés aux situations pour lesquelles les impacts sur la santé des occupants (qui sont à l'heure actuelle difficile à chiffrer précisément) sont dominants. **Ils devraient être pénalisés pour le calcul énergétique.**

Automatisme sur les stores seuls

Cette étude montre que le potentiel d'économie d'énergie liée à l'automatisation des protections solaires est très important, même sans automatisme sur l'éclairage artificiel.

En tout état de cause, la Norme devrait **recommander l'automatisation des stores** comme mesure prioritaire et mieux valoriser la réduction de consommation d'éclairage qui est associée.

Automatisme sur l'éclairage et les stores

Le calcul de la SIA est **pessimiste à très pessimiste** pour l'évaluation des scénarios combinant une automatisation de l'éclairage et des stores.

Les cas Auto-OFF et Régulation en continu (Dimming) avec automatisation des stores montrent un écart très important entre le calcul de la norme et les simulations d'après observations. Un réexamen de la **Norme devrait prendre en compte cette constatation.**

Révision des paramètres de description des protections solaires

Plus généralement, il est **souhaitable que la Norme prennent en compte de manière distincte les différentes caractéristiques des protections solaires** mobiles, à savoir :

Types de protection / Photométrie / Motorisation / Commande

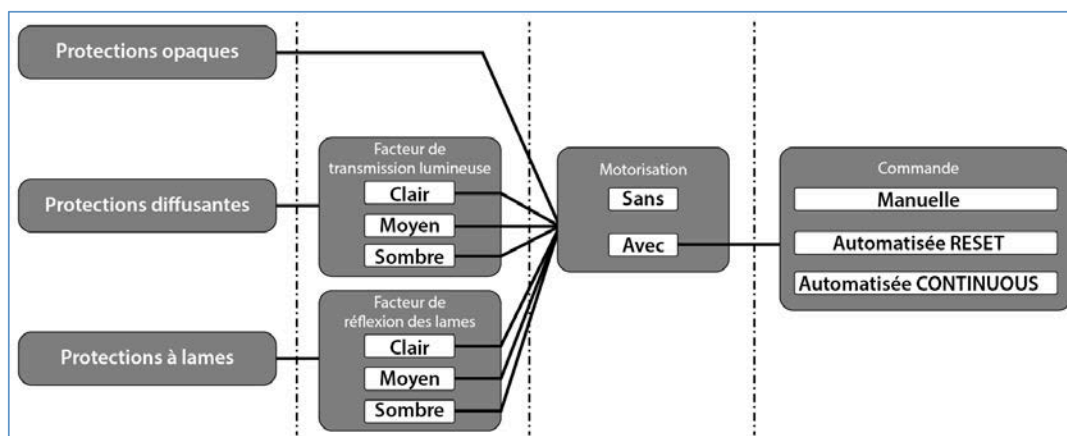


Figure 67 : Proposition de chaîne des facteurs à prendre en compte de manière indépendante dans la nouvelle version de la Norme.

En effet, les combinaisons actuelles représentées par les degrés 1 à 3 sont « hybrides » et ne permettent pas de représenter la réalité.

6.1.2 Sensibilité de la norme au potentiel d'éclairage naturel

A l'occasion de ce travail nous avons mentionné le fait que, dans sa version actuelle, les objectifs de performance en éclairage (valeurs Cible et Limite) ne sont pas constants (cf. § 4.7.11, page 66). Ainsi, on est moins exigeant avec un local dont les ouvertures sont de petites dimensions.

Nous pensons que si cette philosophie est bien adaptée pour les bâtiments à rénover (pour lesquels il est souvent difficile de modifier les ouvertures), elle est en revanche contre-productive pour les bâtiments neufs en ce sens qu'elle ne favorise pas le potentiel de couverture des besoins par la lumière du jour.

Selon la Norme actuelle, pour peu que l'éclairage artificiel soit performant, **il est ainsi plus facile d'atteindre la valeur Minergie pour un local très faiblement vitré** que pour un local dont les ouvertures sont raisonnablement dimensionnées.

Cette approche fortement centrée sur les technologies d'éclairage artificiel pénalise nettement l'utilisation optimale de la lumière naturelle en tant qu'énergie gratuite et renouvelable.

Cet inconvénient majeur doit être corrigé et **la nouvelle version de la Norme devrait comporter une exigence spécifique sur la lumière naturelle**, comme le font la majeure partie des labels internationaux.

Facteur de lumière du jour

La prise en compte de la lumière naturelle est un problème complexe qui ne peut pas être résolu de manière satisfaisante avec une feuille Excel.

Un critère d'évaluation plus réaliste consisterait à utiliser le facteur de lumière du jour comme métrique de référence et à fixer des objectifs en fonction des différentes affectations.

Heureusement, l'évolution des technologies permet aujourd'hui de réaliser des simulations dans un temps raisonnable et de nombreux outils sont d'ores et déjà disponibles sur le marché (DESIGN BUILDER, DIAL+, DIALUX, LIGHTSOLVE, RELUX, VELUX VISUALISER, ..., etc.) qui permettent aux concepteurs de réaliser facilement ces calculs.

Autonomie en éclairage naturel

Une deuxième possibilité consisterait à passer directement au calcul de l'autonomie en éclairage naturel, sur la base de données climatiques.

Cette notion, dont la Suisse fut un des pionniers, avec les diagrammes de l'ASE [9] publiés dès 1989, constitue une métrique beaucoup plus intuitive et facile à communiquer pour les différents intervenants (architectes, maîtres d'ouvrages, etc.).

De plus, elle offre la possibilité de calculer la consommation d'électricité sur la base du temps pendant lequel les besoins en éclairage sont satisfaits.

Enfin, cette approche permet d'intégrer l'orientation et la localisation des bâtiments, ce qui n'est pas possible avec le facteur de lumière du jour.

Plusieurs méthodes sont aujourd'hui à disposition :

- Diffuse daylight autonomy [5], [7]
- Dynamic daylight autonomy [10]
- Continuous daylight autonomy [10]
- Useful daylight Illuminance [11]

Le critère de temps nécessaire pour réaliser les simulations étant déterminant dans la phase de conception, nous pensons qu'il est préférable de se focaliser sur les méthodes les plus rapides ne nécessitant pas de calcul horaire. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé la méthode de l'autonomie en lumière diffuse pour cette étude (**cf. § 4.8, page 67 et suivantes**).

6.2 Collaborations nationales

- HES Lüzern : Ce travail pourra servir de base pour les travaux d'expérimentation en vraie grandeur entrepris dans le module de démonstration de la Haute Ecole de Lucerne. Nous recommandons en particulier de vérifier auprès d'utilisateurs témoins les valeurs d'enclenchement de l'éclairage artificiel en fin de journée.
- Collaboration SageGlass : L'entreprise SageGlass nous a gracieusement fourni les informations utiles pour réaliser les simulations de ses vitrages, et, notamment, les scénarios de commande de la teinte des vitrages.

6.3 Collaborations internationales

- Le choix des protections solaires en tissu analysées au § 4.6.2 a été effectué en collaboration avec l'entreprise Mermet SA (<http://www.sunscreen-mermet.com/>), qui nous a fourni les données photométriques détaillée de ses produits.
- Les résultats de cette étude seront intégrés aux travaux de la tâche 50 de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA-SHC Task 50 <http://task50.iea-shc.org/> "Advanced Lighting Solutions for Retrofitting Buildings").

6.4 Perspectives

L'observation réalisée durant 12 mois consécutifs nous a permis de récolter un ensemble considérable de données.

Nous avons à ce jour pu analyser et exploiter ces informations sur la thématique de l'éclairage et en tirer des conclusions très intéressantes sur l'usage effectif des protections solaires non automatisées.

Pour être totalement cohérent avec l'ensemble des enjeux sous-tendus par l'automatisation des protections solaires, nous pensons qu'il serait judicieux de compléter cette étude par un examen des répercussions de l'automatisation des stores sur le comportement thermique des bâtiments.

En particulier, l'automatisme « RESET », qui est ici uniquement focalisé sur la maximisation de l'éclairage naturel, devrait être modifié pour intégrer des objectifs thermiques (notamment réduction des risques de surchauffe en été).

7 Références

- [1] http://www.meteosuisse.admin.ch/web/fr/climat/climat_aujourd'hui/
- [2] Wienold J. : Dynamic Daylight Glare Evaluation. Eleventh International IBPSA Conference. Glasgow, Scotland July 27-30, 2009.
- [3] L'énergie électrique dans le bâtiment : SIA 380/4 :2006, Bâtiment Génie Civil, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes.
- [4] Paule B. et al : "DIAL-Europe: An European Integrated Daylighting Design Tool ", Proceedings of the PLEA -2002 conference, Toulouse, France, July 2002.
- [5] Paule B., Bouvier F., Courret G. : « Eclairage naturel », Techniques de l'Ingénieur, CC 3315, Fév. 2008.
- [6] Certivéa : Guide pratique du référentiel pour la qualité environnementale des bâtiments, Bâtiment tertiaires, septembre 2011, version du 20/01/2012.
- [7] Paule, B. & Al, "Diffuse Daylighting Autonomy: Towards new targets", Proceedings of the CISBAT'13 Conference, Lausanne, Switzerland, Sept. 2013.
- [8] Hilson Moran, Performance assessment of SageGlass® Electronically Tintable Glazings.
- [9] ASE, Eclairage intérieur par la lumière du jour. Association Suisse des Electriciens, Norme Suisse SN 418911, Zürich, 1989.
- [10] Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *Leukos*, 3(1), 7-31.
- [11] Nabil A, & Mardaljevic J. (2005a). Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm to Access Daylight in Buildings. *Lighting Research & Technology*, 37(1), 41-59.

8 Annexes

8.1 Profils d'autonomie pour le scénario Auto-OFF

(Déclenchement automatique si $E > 500$ lux et enclenchement manuel si $E > 150$ lux)

Les 3 figures ci-dessous montrent les valeurs d'autonomie en éclairage dans le cas où les lampes sont enclenchées par les utilisateurs lorsque l'éclairement au centre du local est inférieur à 150 lux et déclenchées automatiquement dès que l'éclairement dépasse 500 lux.

Façade Sud

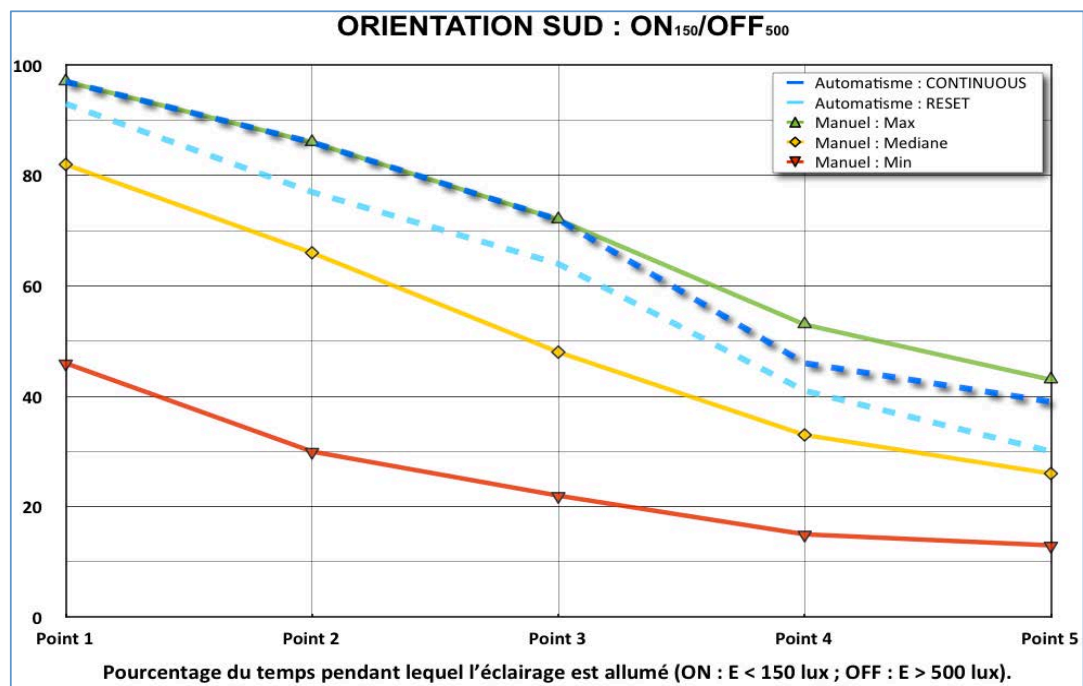


Figure 68 : Façade SUD, profils d'autonomie pour un éclairement compris entre 150 et 500 lux au centre du local.

Façade Est

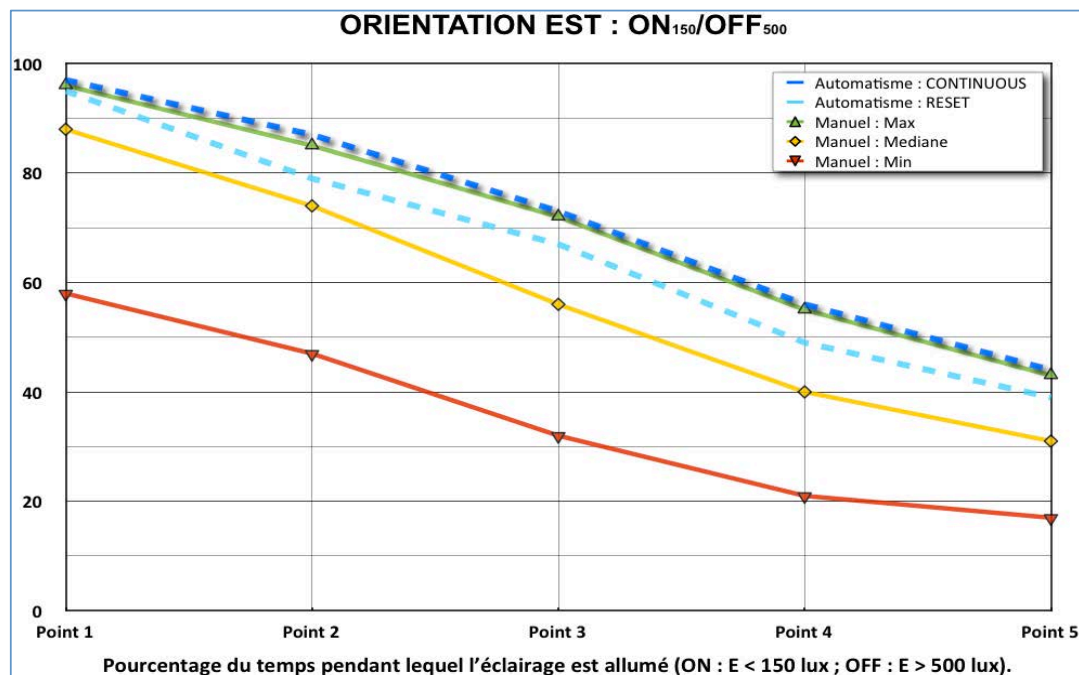


Figure 69 : Façade EST, profils d'autonomie pour un éclairage compris entre 150 et 500 lux au centre du local.

Façade Ouest

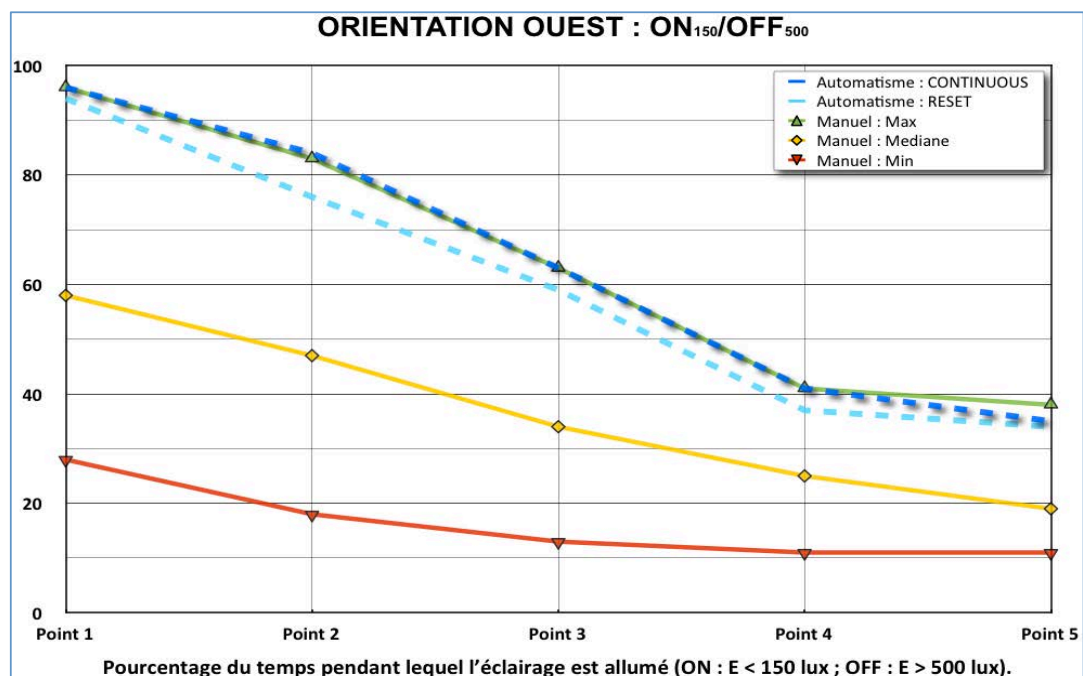


Figure 70 : Façade OUEST, profils d'autonomie pour un éclairage compris entre 150 et 500 lux au centre du local.

8.2 Profils d'autonomie pour le scénario « Dimming »

(Régulation à luminosité constante à 500 lux sans mise en stand-by)

Les 3 figures ci-après montrent les valeurs d'autonomie en éclairage dans le cas où les lampes sont régulées en continu par une sonde d'éclairage de façon à garantir un éclairage de 500 lux au centre du local pendant les heures d'utilisation (7h-18h).

Sachant que la puissance spécifique n'est pas appelée à 100% en permanence, l'autonomie, est basée sur le nombre d'heures « équivalentes » à pleine charge.

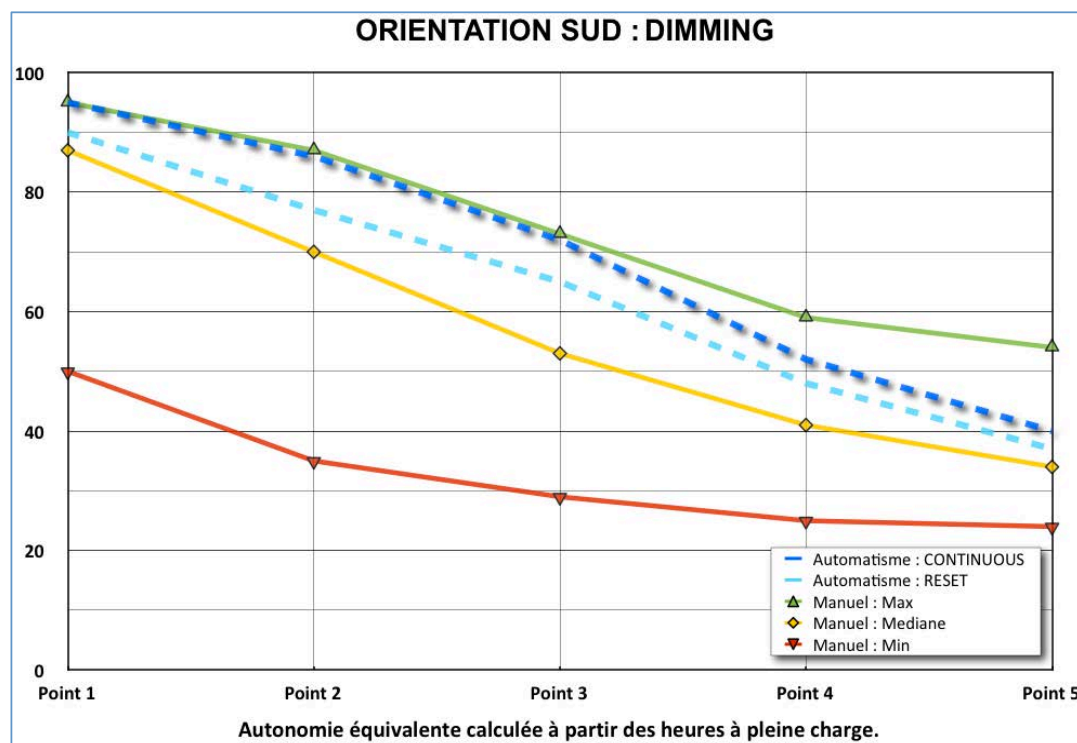


Figure 71 : Façade SUD, profils d'autonomie pour un éclairage régulé en continu à 500 lux

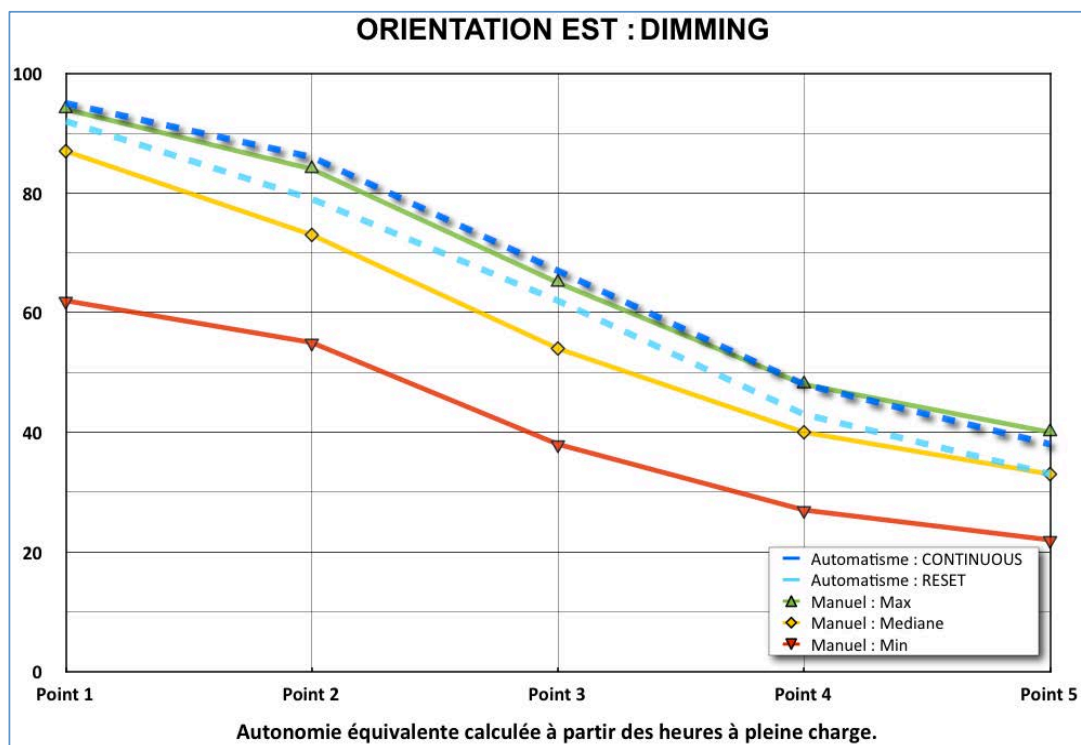


Figure 72 : Façade EST, profils d'autonomie pour un éclairage régulé en continu à 500 lux.

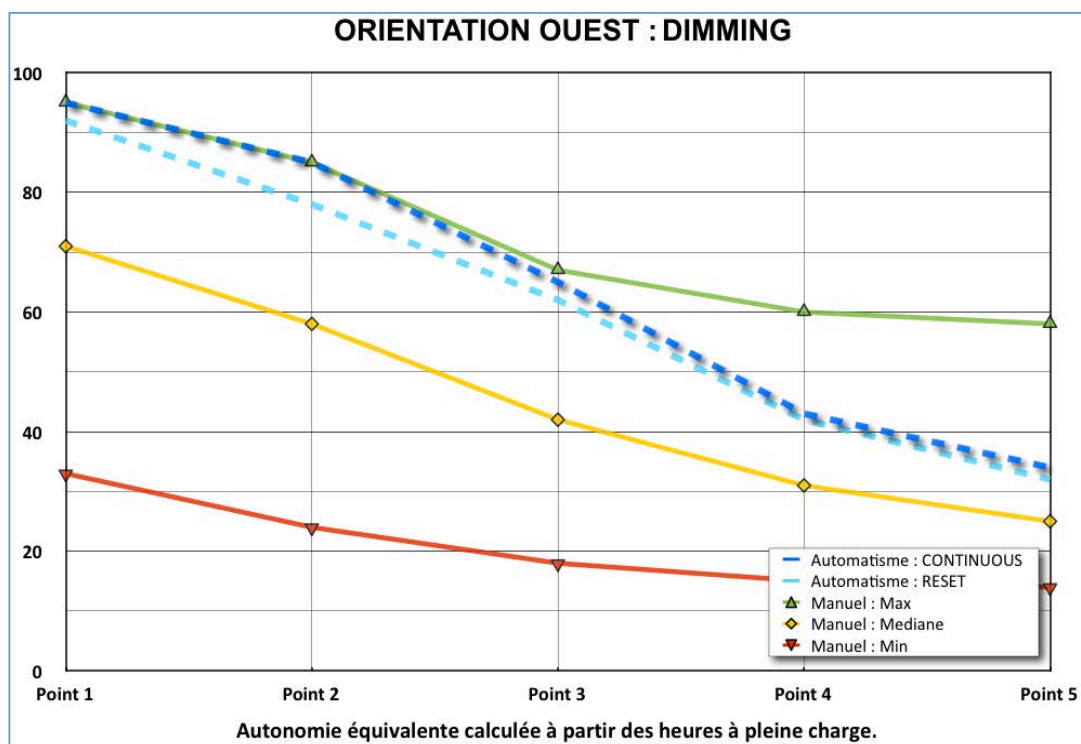


Figure 73 : Façade OUEST, profils d'autonomie pour un éclairage régulé en continu à 500 lux au centre du local.

8.3 Verres à teinte variable électroniquement

8.3.1 Aspects techniques

Les vitrages à teinte variable électroniquement représentent une nouvelle solution intégrée de protection solaire. Ces verres ont la particularité de pouvoir adapter leurs caractéristiques de transmission (visible et énergétique) en appliquant un champ électrique.

L'un des verres est muni de couches minces dont la teinte peut être contrôlée électroniquement. Lorsqu'un courant électrique est appliqué au vitrage, des ions lithium et des électrons sont transférés entre les électrodes CE et EC (cf. Figure 74), ce qui entraîne l'assombrissement du verre. En inversant la polarité, le vitrage retourne à l'état clair.

Le processus peut être contrôlé et interrompu ce qui offre la possibilité d'avoir des états intermédiaires. Certains couples de valeurs transmission visible / facteur solaire sont donnés ci-dessous à titre indicatif (source «Vetrotech Saint-Gobain , pour le vitrage SageGlass »).

Performances	Etat Clair	Intermédiaire 1	Intermédiaire 2	Plus teinté
Transmission lumineuse	60%	18%	6%	<1%
Facteur solaire	0.38	0.12	0.07	0.04
Valeur Ug	1.0 W/m ² .K			

Tableau 28 : Valeurs physiques caractéristiques correspondant aux différents états intermédiaires du vitrage.

La puissance moyenne utilisée par un verre à teinte variable électroniquement est égale à 0.3W/m². De ce fait, la consommation annuelle est approximativement de 2.6 kWh/m² de vitrage installé. Pour un indice de vitrage de 20%, cela représente donc 0.52 kWh/m² de plancher.

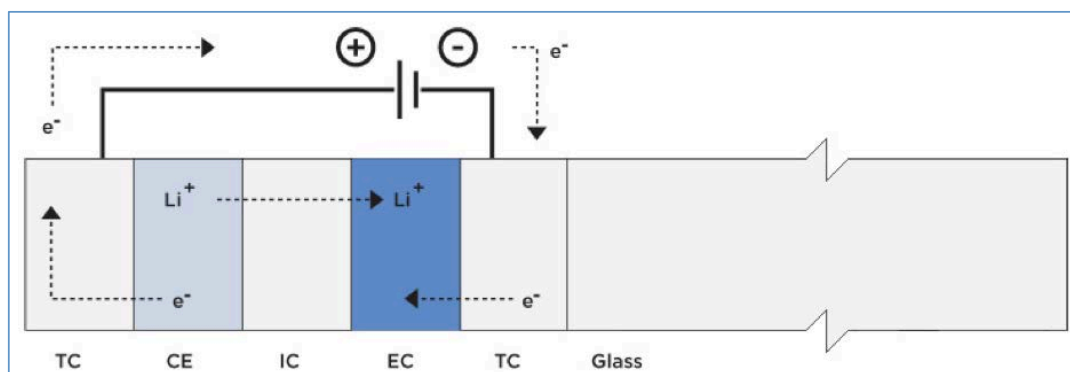


Figure 74 : description sommaire des couches appliquées sur les verres électrochromes (source SageGlass).

8.3.2 Comparaison des résultats obtenus par le verre à teinte variable avec un vitrage à contrôle solaire (TI = 0.60).

Les 3 figures suivantes montrent que, si on le compare à un verre antisolaire, le verre à teinte variable présente des performances très intéressantes.

Afin de faciliter la comparaison avec les résultats montrés précédemment dans ce rapport, nous avons reporté la courbe de performance de l'automatisme CONTINUOUS avec un vitrage avec 80% de transmission lumineuse.

Façade Sud

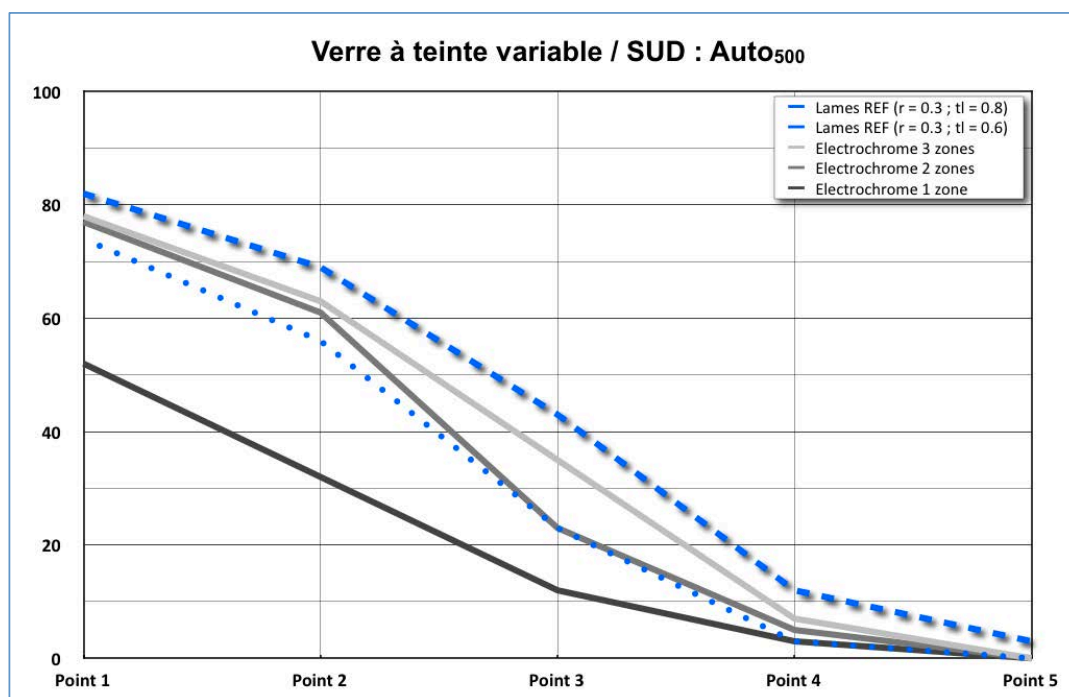


Figure 75 : Façade SUD ; Comparaison des résultats des verres à teinte variable avec un vitrage à contrôle solaire (tl = 0.60), avec l'automatisme CONTINUOUS.

Façade Est

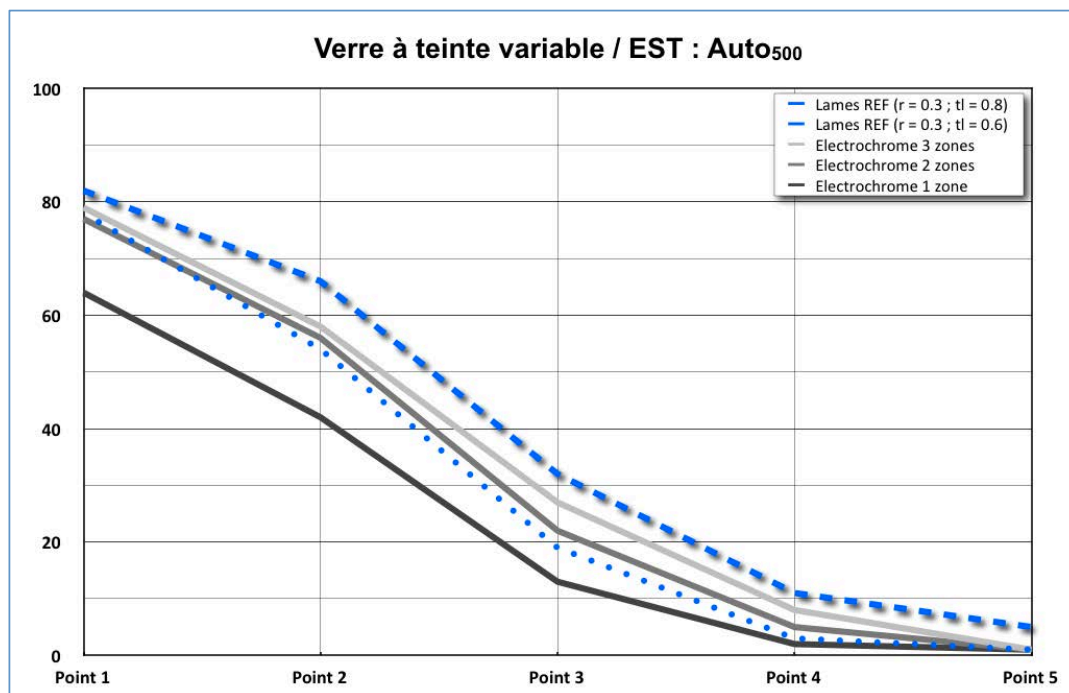


Figure 76 : Façade EST ; Comparaison des résultats des verres à teinte variable avec un vitrage à contrôle solaire ($tl = 0.60$), avec l'automatisme CONTINUOUS.

Façade Ouest

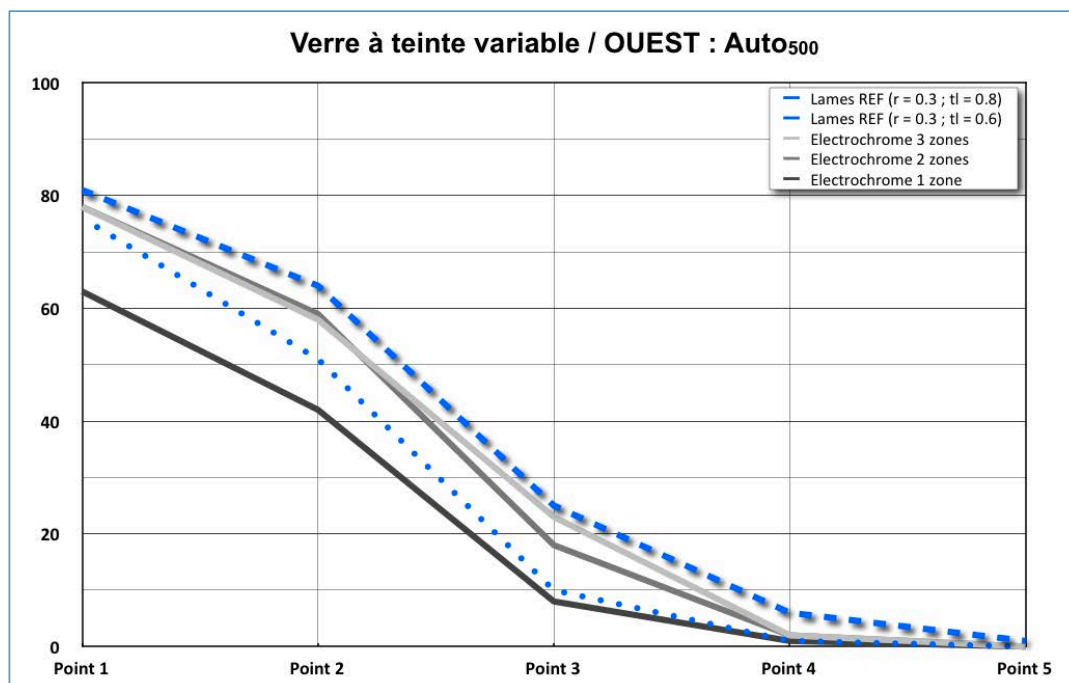


Figure 77 : Façade OUEST ; Comparaison des résultats des verres à teinte variable avec un vitrage à contrôle solaire ($tl = 0.60$), avec l'automatisme CONTINUOUS.