

HUMAN CENTRIC LIGHTING

PROFITER DES OPPORTUNITÉS OU ATTENDRE

Sara KINDT | Eowyn VAN DE PUTTE

Lore VANDEVIVERE

Wouter RYCKAERT

Exécutants de projet

Howest Sciences de la santé appliquées

sara.kindt@howest.be, tgw@howest.be

KU Leuven Laboratorium voor Lichttechnologie

eowyn.vandeputte@gmail.com, wouter.ryckaert@kuleuven

vzw Groen Licht Vlaanderen

info@groenlichtvlaanderen.be

Avec le soutien de

VLAIO (projectnr. 180018: "Human Centric Lighting: mogelijkheden benutten of bang afwachten?") et avec le précieux soutien financier de nos partenaires:

Attentia | B.E.G. | Boydens Engineering | Cebeo | DeltaLIGHT | Eloya Encon | Esylux | Etap | F.E.E. | Feilo Sylvania | G.I.A. | Groen Licht Vlaanderen vzw | Helvar | IDEWE | Kreon | Liantis | LightConsult

Lign | Luxendi | Motena | Nelectra | Odid | PITS Modular | Retail Office Signify | Sint-Jozefskliniek Izegem | Techlink | Trilux | UZ Leuven VIPA | Volta-Tecnolec | Volvo Trucks | WTCB | en Zumtobel

***Important** : Le document original est en Néerlandais. Ceci est une brève traduction non professionnelle du document original réalisée uniquement pour cette page web de VOLTA et pourrait contenir des fautes de traduction. En cas de doute, veuillez vous référer au document original dans la partie néerlandophone de cette page web.*

CONTENU

QU'EST-CE QUE LE HUMAN CENTRIC LIGHTING?	5
Impact de la lumière sur le fonctionnement biologique	6
Impact de la lumière sur la fonction physique	7
Impact de la lumière sur le fonctionnement cognitif	7
Lumière d'impact sur le fonctionnement émotionnel.....	9
COMMENT QUANTIFIER : MEDI et MDER.....	11
Quantités de lumière	11
Grandeurs radiométriques	11
Grandeurs photométriques.....	13
Variables mélanophiques.....	15
MEDI.....	16
Illustrations de Calcul	19
Éclairage photopique	19
Éclairage mélanopique.....	19
MEDI	20
MDER.....	21
PARAMÈTRES D'ÉCLAIRAGE HCL DESIGN	22
Paramètres visuels	22
Paramètres non visuels	23
Comment mesurer MEDI en pratique ?	24
Conseils pour l'adaptation de MEDI	25
Comment augmenter le MEDI grâce à la conception de l'éclairage?.....	25
Comment augmenter le MEDI via l'intérieur?	27
COMMENT ÉVALUER UN MODÈLE HCL ?	28
Adultes.....	29
Sommeil et rythme circadien	29
Fonctionnement cognitif	30
Fonctionnement émotionnel	31
Personnes âgées.....	31
Sommeil et rythme circadien	31
Fonctionnement cognitif	32
Fonctionnement émotionnel	32
CONCLUSION.....	33
ANNEXE 1 COMMENT TRAVAILLER AVEC MEDI DANS DIALUX?	34
Comment calculer MEDI dans DIALux?	34
Comment faire fluctuer MEDI dans DIALux?.....	39

BIJLAGE 2 | SYSTÈME CIE POUR LA MÉTROLOGIE DU RAYONNEMENT OPTIQUE POUR LES
RÉPONSES INFLUENCÉES PAR L'IPRGC À LA LUMIÈRE 41

Qu'est-ce HUMAN CENTRIC LIGHTING?

L'éclairage centré sur l'humain (HCL) est l'optimisation de l'éclairage en tenant compte des effets de bien-être visuel et non visuel de la lumière sur les humains. C'est ce que l'on appelle également la lumière « biodynamique » ou « circadienne ». En raison de cette vision intégrale de la lumière, la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) a récemment introduit le terme d'éclairage intégratif comme terminologie officielle. Jusqu'à récemment, l'accent était mis uniquement sur l'importance visuelle de la lumière. Cela prend en compte les préférences spécifiques des personnes, telles que l'éclairement / luminance, la température de couleur, le rendu des couleurs ou le degré de lumière (in)directe ressenti comme le plus agréable. Notre système visuel possède quatre récepteurs de lumière dans l'œil qui sont impliqués dans cela. Les bâtonnets sont importants pour détecter les mouvements et voir à des niveaux de lumière très faibles, tandis que trois types de cônes sont importants pour la perception des couleurs.

Au début des années 2000, un cinquième type de récepteur de lumière a également été découvert qui joue un rôle crucial dans le système non visuel de notre œil. Celles-ci sont appelées « cellules ganglionnaires rétiniennes intrinsèquement photosensibles » (ipRGC) et contiennent le photo pigment mélanopsine. Ces cellules sont directement reliées par le nerf optique à notre horloge biologique, qui joue un rôle crucial dans la régulation de notre rythme veille-sommeil. La lumière pendant la journée et l'obscurité le soir et la nuit font que notre horloge biologique interne se synchronise avec le rythme environnemental. Par conséquent, nous sommes actifs ou endormis aux bons moments de la journée. Il est important d'être exposé à une lumière avec une proportion suffisamment élevée de longueurs d'onde courtes (via la lumière du jour ou des lampes LED accordées) pendant au moins 30 minutes chaque jour entre 6 et 11 heures. Cette lumière est également appelée « lumière bleue » dans les médias populaires. Cependant, la présence de longueurs d'onde cyan (bleu-vert) n'est pas suffisante. Afin d'obtenir un effet réel, une irradiance (intensité) élevée est vraiment cruciale. Par exemple, il ne suffit pas de modifier la température de couleur tout au long de la journée (blanc réglable). L'exposition à la lumière le matin assure la meilleure synchronisation de notre horloge biologique avec l'environnement. C'est d'autant plus important que dans la société d'aujourd'hui, nous sommes souvent assis à l'intérieur (90% du temps) dans des pièces insuffisamment éclairées. L'éclairage peut être suffisant pour effectuer notre tâche visuelle, mais la plupart des éclairages sont insuffisants pour notre fonctionnement biologique et sont parfois appelés obscurité biologique.

L'impact de la lumière sur le fonctionnement biologique

Les humains sont des animaux diurnes, ce qui signifie que nous (dans la plupart des cas) sommes actifs pendant la journée et dormons la nuit. Malheureusement, le rythme de notre horloge biologique interne (24 heures et 9 minutes en moyenne) ne correspond pas toujours au temps ambiant (24 heures). Sans exposition à la lumière le matin, 85% de la population se coucherait plus tard et se lèverait de plus en plus tard. Résultat, au bout d'une semaine, nous avons déjà plus d'une heure (9 minutes x 7 jours = 63 minutes) de retard dans le rythme scolaire ou professionnel. C'est pourquoi ce phénomène est également appelé « **décalage horaire social** ». Nous commencerions à prendre du retard par rapport à l'environnement parce que la production de nos hormones et nos processus corporels, qui fluctuent normalement selon un schéma fixe tout au long de la journée, seraient perturbés. Par conséquent, nous avons besoin de donneurs de temps externes pour synchroniser notre horloge biologique avec l'horloge ambiante. La lumière et la température sont des indices environnementaux qui indiquent l'heure de la journée.

L'exposition à la lumière est le mécanisme le plus important pour réinitialiser notre horloge biologique avec le temps ambiant. Après tout, la lumière est reliée par le nerf optique au noyau suprachiasmatique, la partie du cerveau où se trouve notre horloge biologique. La correction de notre horloge interne, appelée « **synchronisation** », doit être effectuée tous les jours pour s'assurer que les périodes d'éveil et de sommeil correspondent le plus possible aux périodes où il fait jour et nuit. Une mauvaise synchronisation peut entraîner de graves problèmes de sommeil et d'autres problèmes de santé. L'installation et la mise en place d'un éclairage approprié peuvent aider à prévenir ces maux.

L'impact de la lumière sur la synchronisation de notre horloge biologique dépend de l'heure, de la durée et de la quantité d'exposition à la lumière. Lorsque nous sommes exposés à la lumière le matin (6h-11h), nous veillons à ce que notre hormone du sommeil (mélatonine) soit arrêtée plus tôt, de sorte que nous sommes actifs plus rapidement le matin. Bien sûr, cet effet est plus important si vous êtes exposé à des niveaux de lumière élevés plus tôt le matin (par exemple à 6 heures au lieu de 10 heures). De plus, la lumière du matin assure également la production de mélatonine plus tôt dans la soirée, ce qui nous permet de nous endormir plus rapidement le soir. Cependant, si nous sommes exposés à la lumière le soir ou la nuit (18h-6h), nous commencerons à prendre encore plus de retard sur l'environnement le lendemain. Concrètement, cela signifie que nous nous coucherions plus tard et que nous dormirions plus longtemps si aucun réveil ne sonnait. C'est pourquoi, en plus de beaucoup de lumière le matin, il est également important de tamiser la lumière à partir de 18 heures afin que la production de mélatonine puisse être produite plus rapidement le soir et que nous nous endormions plus facilement le soir. Cela favorisera également la production de cortisol le matin, l'hormone qui nous active. De plus, la durée et la quantité d'exposition à la lumière joueront bien sûr également un rôle : plus l'exposition est longue et plus l'éclairement est élevé, plus le décalage de notre horloge biologique sera important. L'éclairement minimum recommandé pour la lumière du matin est un MEDI (voir ci-dessous) de 200 à 240 lux au niveau des yeux. Par exemple, une source lumineuse commune avec une température de couleur de 3500 K représente environ 400 à 500 lux.

Impact de la lumière sur la fonction physique

Les perturbations des processus métaboliques et du sommeil induites par le rythme circadien peuvent avoir un impact négatif à long terme sur notre fonctionnement physique. Un éclairage inapproprié peut même augmenter le risque de maladies cardiovasculaires, de troubles immunitaires, de diabète et de cancer. Après tout, un rythme circadien perturbé provoque une perturbation des processus hormonaux et des fonctions corporelles. Entre autres, les fluctuations de notre tension artérielle et de notre fréquence cardiaque sont régulées par le rythme circadien et suivent idéalement un schéma de 24 heures. Si ce rythme devient déséquilibré, il peut augmenter le risque de maladies cardiovasculaires. De plus, le rythme circadien joue également un rôle dans le contrôle de notre digestion, de l'hormone de croissance et de l'insuline. Des perturbations dans ces processus peuvent donc donner lieu à l'obésité. Ensuite, l'hormone mélatonine n'est pas seulement importante pour notre sommeil, mais aussi pour notre réparation cellulaire. Ceci, à son tour, peut entraîner des perturbations de notre système immunitaire, ce qui peut augmenter le risque de cancer (par exemple, l'allaitement de nuit).

Les personnes qui travaillent de nuit ou en équipes (en particulier les rotations rapides) ont souvent des perturbations de leur rythme circadien en raison d'une exposition insuffisante à la lumière, ce qui perturbe les processus hormonaux et augmente le risque de troubles physiques. L'un des moyens les plus efficaces d'améliorer le sommeil est de dormir à une heure fixe et de se lever à une heure fixe. Il n'est donc pas surprenant que lorsque les gens travaillent par quarts, le rythme veille-sommeil soit mis à rude épreuve. Heureusement, ces effets négatifs peuvent également être atténués au moyen d'un éclairage approprié pendant le travail de nuit (par exemple, un éclairage avec un faible MELI).

Impact de la lumière sur le fonctionnement cognitif

La lumière a non seulement un impact sur notre sommeil et notre santé physique, mais aussi sur le fonctionnement cognitif.

QU'EST-CE QUE LA COGNITION ??

La cognition est une question complexe qui se divise en différents niveaux. Tout d'abord, nous avons notre *vigilance de base*, qui en dit long sur notre niveau d'énergie (à quel point nous sommes éveillés ou somnolents). De plus, nous avons besoin d'une deuxième forme d'attention, un peu plus complexe, lorsque nous voulons a) concentrer notre attention de manière ciblée sur une certaine tâche, b) la répartir sur plusieurs tâches en même temps, ou c) la maintenir pendant une période plus longue. Enfin, il existe une troisième forme d'attention, plus complexe (le contrôle exécutif), dans laquelle la *coordination des processus d'attention* est centrale : par exemple, inhiber le comportement, passer d'une tâche à l'autre, planifier et penser à l'avance, stocker temporairement des informations, etc. La lumière peut avoir un impact sur tous les niveaux d'attention, bien que l'impact à court terme le plus évident ait été démontré principalement au niveau de notre vigilance de base. Pour influencer des formes d'attention plus complexes, une exposition à long terme à la lumière est nécessaire et l'effet n'est attendu qu'à plus long terme. La recherche fait encore défaut.

QUELS SONT LES MÉCANISMES ?

La lumière du matin contrôle notre horloge biologique et affecte la qualité de notre sommeil. Comme nous sommes plus alertes pendant la journée après une bonne nuit de sommeil, l'exposition à la lumière aura également un impact sur notre vigilance le lendemain. Une exposition suffisante à la lumière le matin vous aidera à bien dormir cette nuit-là, ce qui vous rendra plus alerte et fonctionnera mieux pendant la journée le lendemain. Ce processus implique un impact indirect de la lumière via le sommeil (**voie circadienne**). La lumière peut également déclencher un effet d'activation directe ou de vigilance « aiguë » (**voie photobiologique**) comme boire une tasse de café. La lumière le matin et l'après-midi peut apporter une amélioration aiguë de la vigilance. Des études scientifiques ont pu montrer cette deuxième voie en particulier, d'une part sur la perception subjective des personnes (les personnes se sentent plus alertes) et d'autre part sur des paramètres objectifs (temps de réaction aux tâches informatiques qui mesurent la vigilance).

QUEL EST L'IMPACT DE LA LUMIÈRE SUR NOS PERFORMANCES ?

Les employés qui sont exposés à des valeurs MEDI élevées (voir ci-dessous) le matin se sentent plus alertes et peuvent mieux se concentrer. Cette concentration accrue peut et va conduire à une amélioration de la performance au travail et de la productivité (par exemple, une diminution des temps de montage). Les enfants sont également plus attentifs pendant les cours et obtiennent de meilleures notes aux tests lorsqu'ils sont exposés à des valeurs MEDI élevées le matin. De plus, les élèves sont également moins somnolents lorsqu'ils se lèvent et sont alertes plus tôt en classe. Ceci est particulièrement important pour les types du soir car ils ne sont pas encore fonctionnels pendant les heures du matin. Pour les types du soir, la solution peut donc être de quitter les heures d'école ou d'avancer le rythme circadien en s'exposant à des niveaux élevés de MEDI le matin, ce qui les rend alertes plus tôt.

DE QUELLE QUANTITÉ DE LUMIÈRE AVONS-NOUS BESOIN POUR ÊTRE PLUS VIGILANTS ?

Il est difficile d'établir une limite claire à partir du moment où il y a un effet sur l'attention, car cela dépend également de la personne, du contexte de travail, du degré de fatigue/problèmes de sommeil, du type de travail, des expositions antérieures à la lumière, ... Il est donc utile de mettre en œuvre un scénario d'éclairage dynamique dans lequel les niveaux d'éclairage sont adaptés à l'heure de la journée et aux conditions individuelles (voir par exemple la figure 1). Le matin, c'est la lumière qui a le plus d'effet sur notre synchronisation. L'impact sur notre vigilance est donc indirect via la voie circadienne. À partir de 11 h, le MEDI peut être réduit de 250 à 85 MEDI. Après le déjeuner, un léger boost de 30 minutes peut être réglé à 200 MEDI pour contrer la baisse après le déjeuner. Il s'agit alors d'un effet de vigilance direct (voie photobiologique). Par la suite, le MEDI peut être à nouveau affaibli afin de ne pas perturber la production de mélatonine (hormone du sommeil).

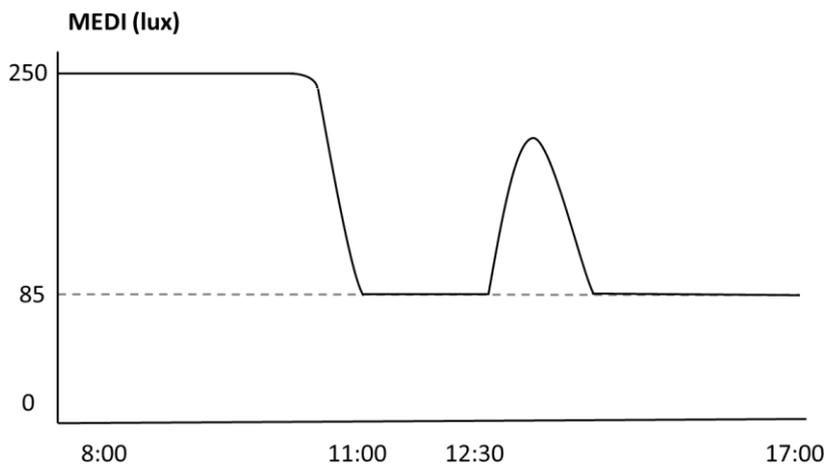


Figure 1. Exemple de scénario d'éclairage dynamique dans le contexte de travail.

Lumière d'impact sur le fonctionnement émotionnel

LUMINOTHÉRAPIE

Une application bien connue de la lumière pour améliorer le fonctionnement émotionnel est la luminothérapie, dans laquelle on est exposé à des valeurs MEDI très élevées (1800-7500 lux) au moyen de caissons lumineux ou de verres lumineux pendant la journée (idéalement le matin). De nombreuses études ont montré que la luminothérapie est efficace pour le traitement de diverses formes de dépression. Après une à deux semaines, l'impact positif de la luminothérapie sur les symptômes dépressifs peut déjà être déterminé. Dans la dépression saisonnière, la luminothérapie produit des résultats positifs chez les enfants, les adolescents et les adultes. Ce n'est pas surprenant, car les dépressions saisonnières sont causées par une exposition à trop peu de lumière matinale pendant les mois sombres de l'hiver. De plus, chez les personnes qui souffrent du blues hivernal typique, il a été démontré que la lumière le matin améliore l'humeur, la vigilance et augmente les niveaux d'énergie. Dans la dépression non saisonnière, il existe également des effets clairs à court terme de la lumière le matin, en particulier chez les personnes qui ont accumulé une privation de sommeil à la suite de la dépression.

RELIGHTING

Des études qui ont ajusté l'éclairage selon les critères HCL montrent que l'éclairage ajusté peut entraîner une amélioration de l'humeur émotionnelle à long terme (diminution de l'anxiété, de la dépression, des affects négatifs) car le sommeil et le rythme circadien sont mieux équilibrés. En outre, des études montrent également que l'éclairage adapté peut également avoir un effet édifiant et activateur direct. Des valeurs MEDI plus élevées peuvent directement favoriser l'humeur et la vitalité, tout comme une musique joyeuse peut immédiatement nous remonter le moral. Ces effets positifs de la lumière sur le bien-être émotionnel ont été démontrés dans divers contextes. Tant dans le **contexte de travail** au bureau que dans un environnement industriel, l'éclairage adapté s'est avéré réduire les sentiments anxieux et dépressifs. À plus long terme, des simulations/études montrent que l'éclairage adapté peut conduire à moins d'absentéisme et à un engagement plus fort des employés grâce à une résilience émotionnelle accrue.

Dans le domaine de l'éducation, l'éclairage adapté de la salle de classe a également eu une influence positive sur l'humeur des élèves. Enfin, des études montrent qu'un éclairage adapté dans la salle de jour d'un centre de soins résidentiels peut entraîner une réduction des symptômes dépressifs chez les résidents atteints de **démence**.



Parce que la lumière a une forte influence sur notre santé mentale et physique, il est donc crucial que nous nous concentrons sur les effets non visuels de la lumière en plus de l'optimisation visuelle, de l'éclairage économe en énergie et durable. L'accent unilatéral qui consiste à ne prendre en compte que les coûts d'installation, de maintenance et de consommation d'énergie lors du calcul des périodes d'amortissement (ROI) rend trop difficile l'établissement de systèmes d'éclairage haute performance. Il faut donc se féliciter que, par exemple, le système de certification WELL prenne en compte le bien-être des individus.

COMMENT QUANTIFIER: MEDI ET MDER

Quantités de lumière

Afin de quantifier la lumière, il est important de distinguer différentes grandeurs lumineuses : les grandeurs radiométriques (liées à l'énergie rayonnante, y compris le rayonnement infrarouge) et les grandeurs photométriques (qui prennent en compte la sensibilité oculaire de l'œil humain afin de décrire notre perception visuelle). De plus, des quantités d'HCL mélanopiques ont récemment été développées pour quantifier l'impact de la lumière sur notre bien-être (système circadien). Pour clarifier les nouvelles grandeurs mélanopiques, nous les comparerons avec les grandeurs de base radiométriques et photométriques de la lumière.

Grandeurs radiométriques

Lorsque l'on parle de l'ensemble du spectre électromagnétique (voir Figure 2) des longueurs d'onde (infrarouge-visible-ultraviolet) émises par une source lumineuse sans tenir compte de la sensibilité oculaire, on parle de « grandeurs radiométriques ». Le **flux/puissance rayonnante Φ_e** est une grandeur radiométrique connue et est définie comme la vitesse à laquelle l'énergie rayonnante est transférée. Le courant rayonnant peut être considéré comme la puissance associée à l'onde électromagnétique et a pour unité **Watts (W)**. Le flux rayonnant Φ_e est calculé en intégrant la densité spectrale de la source lumineuse sur toutes les longueurs d'onde (λ) :

Cette formule est facile à interpréter graphiquement. Φ_e correspond à l'aire comprise entre la courbe et l'axe horizontal (Figure 3).

radio golven	micro golven	infrarode straling			zichtbaar licht				ultraviolet licht		röntgen straling	gamma stralen	
		ver-infrarood 0.01 - 1nm	middel-infrarood 0.01 - 0.03 nm	nabij-infrarood 780 - 10.000 nm	380 - 800 nm				UV-A 315 - 400 nm	UV-B 280 - 400 nm	UV-C 100 - 280 nm		

1 nm = 1 miljoenste milimeter

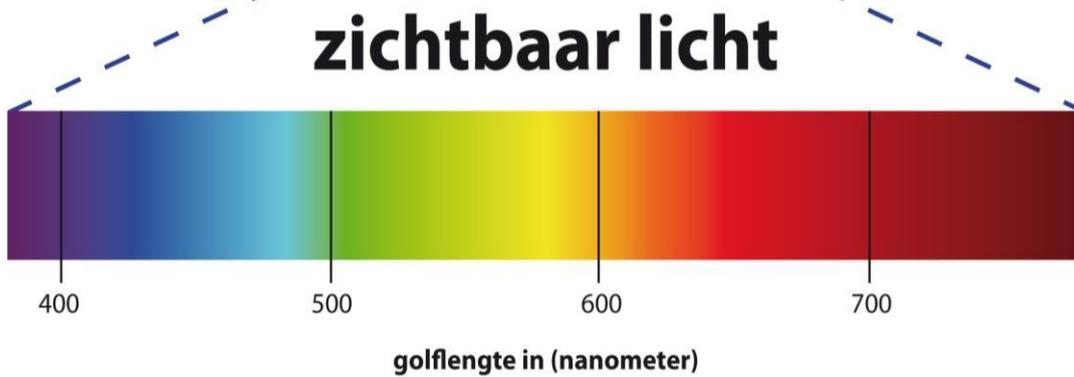


Figure 2. Vue d'ensemble des longueurs d'onde et des désignations.

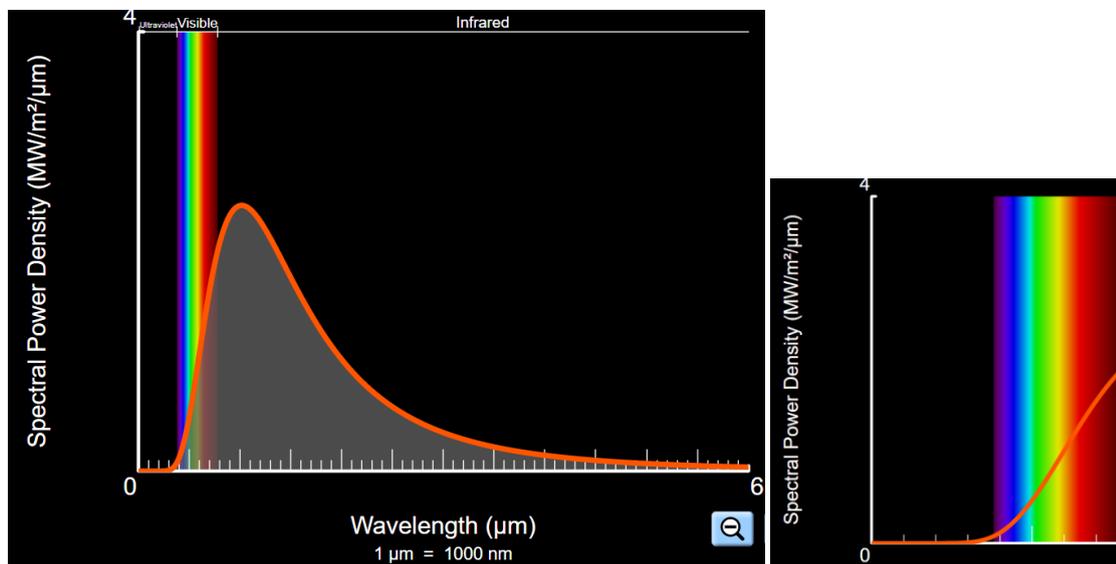


Figure 3. Flux spectral de rayonnement d'une lampe halogène (illuminant A ; image de gauche). La valeur intégrée est égale au flux rayonnant et correspond à l'aire sous la courbe. Vous pouvez voir que cette lampe ne couvre qu'une petite partie du spectre visuel (image de droite).

Une deuxième grandeur radiométrique qui peut être liée à cela est l' **irradiance E_e** , qui exprime la quantité de courant de rayonnement (W) qui tombe sur une certaine surface (m^2). L'unité de l'

l'irradiance est donc **de W/m²**. Par exemple, l'irradiance (W/m²) est utilisée pour calculer le nombre de panneaux solaires nécessaires à un certain endroit sur terre.

$$E_e = \int_{\text{all } \lambda} E_e(\lambda) d\lambda$$

Φ_e et E_e sont donc des grandeurs qui sont liées à la puissance du rayonnement. C'est pourquoi on les appelle « radiométriques ». L'indice 'e' signifie 'énergétique', se référant à une grandeur purement physique sans aucune relation avec la réponse visuelle de l'observateur. Par exemple, une lampe infrarouge (IR) a un flux rayonnant élevé (qui libère de la chaleur), mais peu de lumière visible en sort. Pour quantifier la partie visible (de 380 nm à 780 nm) du spectre lumineux, des grandeurs photométriques ont été développées.

Grandeurs photométriques

Dans l'éclairage, cependant, les grandeurs radiométriques sont rarement utilisées. En pratique, les quantités de lumière photométrique sont utilisées pour décrire l'expérience de l'observateur (la quantité de « lumière » qui tombe sur l'œil) et donc la lumière visible. Lorsque le rayonnement de la source lumineuse frappe l'œil humain, les cellules sensibles à la lumière de la rétine (récepteurs de lumière) réagissent. Ces récepteurs de lumière contiennent un pigment unique qui détermine les longueurs d'onde auxquelles le récepteur de lumière est sensible. La conséquence logique est que la puissance d'une source lumineuse n'est pas une mesure directe de notre perception visuelle. Chaque longueur d'onde de la source lumineuse provoque une réponse visuelle différente. Si l'on tient compte de la sensibilité de l'œil, et qu'il ne reste donc que les longueurs d'onde de la source lumineuse qui se situent dans la courbe de sensibilité visuelle de l'œil (c'est-à-dire de 380 nm à 780 nm, le reste que nous ne « voyons » pas de toute façon et est donc multiplié par 0), alors on parle de « grandeurs photométriques ». Plus précisément, la courbe de sensibilité de l'œil photopique ($V(\lambda)$) représente la sensibilité moyenne de l'œil humain à différentes longueurs d'onde et peut être utilisée pour convertir l'énergie rayonnante en quantités lumineuses.

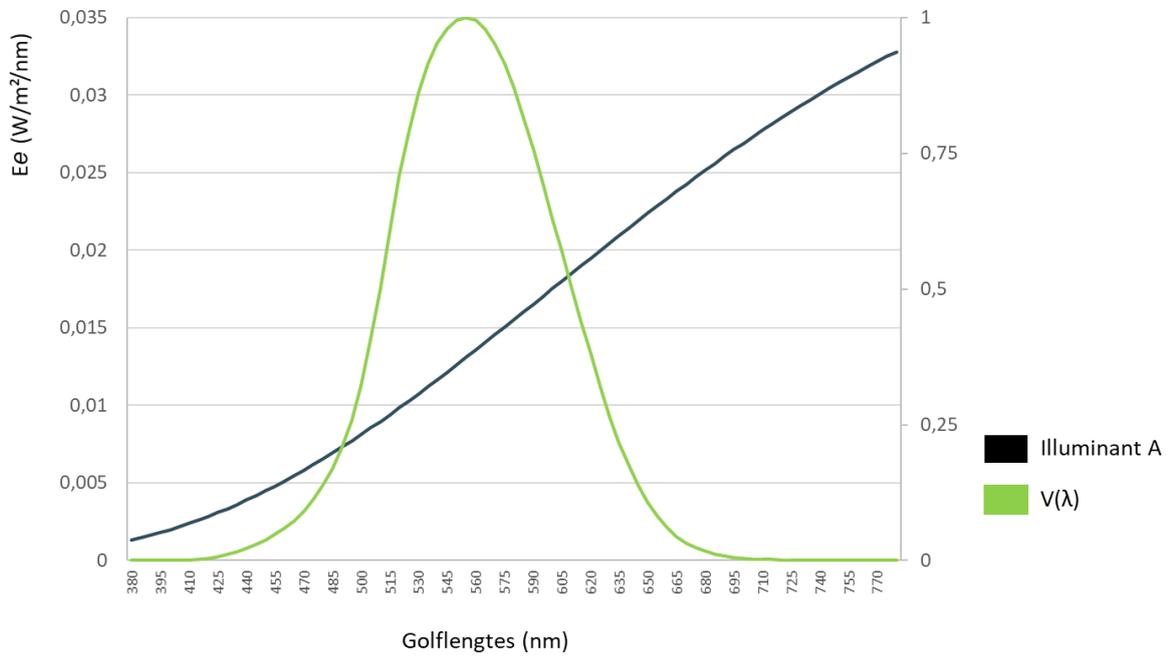
Le système visuel est principalement déclenché par les cônes qui sont sensibles aux longueurs d'onde moyennes (vertes) et longues (rouges). La courbe de sensibilité de l'œil photopique a donc une sensibilité maximale à la lumière avec des longueurs d'onde (vert/jaune) de 555 nanomètres (nm). Presque toutes les quantités de lumière utilisées pour la conception et la recherche sur l'éclairage sont dérivées de cette courbe de sensibilité oculaire photopique, qui quantifie les aspects visuels de la lumière.

Pour obtenir la grandeur photométrique correspondant au flux/irradiance de rayonnement radiométrique, il faut multiplier le flux/irradiance spectral de rayonnement par la sensibilité photopique de l'œil, puis additionner ou intégrer toutes les contributions¹. La sensibilité oculaire peut être considérée comme un facteur de pondération spectrale équivalent à un effet de filtrage. La figure 4 illustre cela graphiquement. Plus précisément, nous prendrons l'intégrale, en additionnant l'aire sous la courbe.

¹ Et encore multiplier par 683 – voir formule p.16

a)

Ooggevoeligheidscurve $V(\lambda)$ en spectrale bestralingssterkte van een oppervlak verlicht door een lichtbron met illuminant A spectrum (bv. halogeenlamp)



b)

Illuminant A * $V(\lambda)$

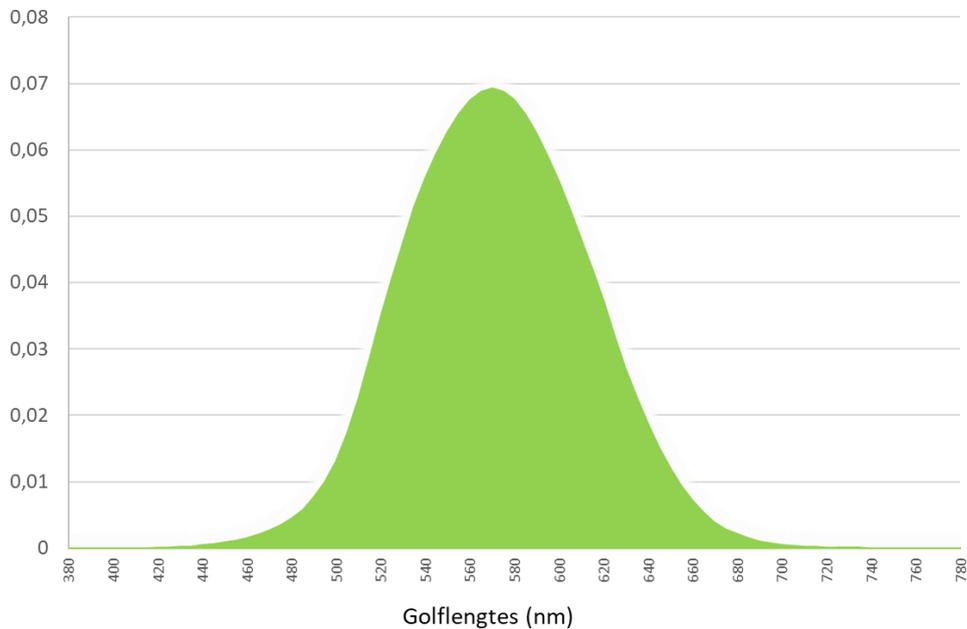


Figure 4. (a) *Courbe de sensibilité oculaire et irradiance spectrale.* b) *La multiplication, l'intégration et l'application d'un facteur d'échelle donnent lieu à la quantité photométrique du flux lumineux, exprimée en lux.*

Il en résulte l'**éclairage** : E_v , exprimé en Lux (lx) ou le flux lumineux : Φ_e exprimé en lumens (lm). Ces grandeurs peuvent donc être considérées comme les équivalents photométriques de l'irradiation E_e et de la puissance de sortie (flux rayonnant Φ_e). Lors de la conversion de grandeurs radiométriques en grandeurs photométriques, un facteur d'échelle historiquement enregistré de 683 est utilisé. Par exemple, la formule pour passer du flux spectral de rayons au flux lumineux est donnée par :

$$\Phi_e = 683 \int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Pour les grandeurs photométriques liées à la réponse visuelle, le sous-indice 'e' n'est pas utilisé. Lors du calcul des grandeurs photométriques, les limites d'intégration sont limitées au spectre visible (380 nm - 780 nm) car en dehors de cet intervalle de longueur d'onde, la sensibilité de l'œil est de toute façon nulle. Par exemple, le rayonnement infrarouge (780 nm - 1 mm) représente la puissance, mais ne sera pas remarqué par l'œil humain, car ce rayonnement ne tombe pas dans l'intervalle de longueur d'onde photométrique. L'éclairage E_v , exprimé en lux, exprime la quantité de flux lumineux (lumens) qui tombe sur une surface donnée (m^2) dans toutes les directions et peut donc être exprimée en lumens/ m^2 (voir formule ci-dessous). Dans la pratique, cependant, le lumens/ m^2 est remplacé par le **lux** comme unité officielle d'éclairage lumineux. Par exemple, dans un environnement de bureau, il est nécessaire qu'au moins 500 lux tombent horizontalement sur la surface de travail. Le rayonnement solaire global (= irradiance E_e) dans notre pays dans des conditions optimales (ciel clair, midi) est d'un maximum de 1000 W/ m^2 . Nous mesurons/calculons les éclairage E_v à la lumière du jour, nous obtenons des valeurs qui peuvent même dépasser 100 000 lux.

$$E[\text{lx}] = 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad [\text{lx}]$$

Variables mélanophiques

Presque toutes les grandeurs, telles que l'éclairage lumineux, sont dérivées de la courbe de sensibilité oculaire photopique $V(\lambda)$, qui quantifie les aspects visuels de la lumière. Cependant, la lumière n'est pas seulement cruciale pour la vision, mais aussi pour la régulation de notre système circadien. Contrairement au système visuel, qui est activé par la lumière frappant les bâtonnets et les cônes, le système non visuel est principalement activé par les ipRGC. Les ipRGC contiennent le photopigment mélanopsine, qui est sensible à une partie différente du spectre lumineux (sensibilité oculaire mélanopique) que les bâtonnets et les cônes. La **courbe de sensibilité oculaire mélanopique** $Smel(\lambda)$ a une sensibilité maximale à 490 nm (=cyan, courbe de gauche figure 5) et est donc plus sensible aux longueurs d'onde plus courtes par rapport à la courbe de sensibilité oculaire photopique qui a une sensibilité maximale à 555 nm (=vert, courbe de droite figure 5). Pour mesurer l'influence de la lumière sur le système biologique, nous devons utiliser la courbe de sensibilité oculaire mélanopique $Smel(\lambda)$. C'est pourquoi des grandeurs mélanopiques alternatives ont été créées, telles que le « MED1 » et le « MDER », afin que l'impact non visuel de la lumière sur le bien-être puisse également être quantifié.

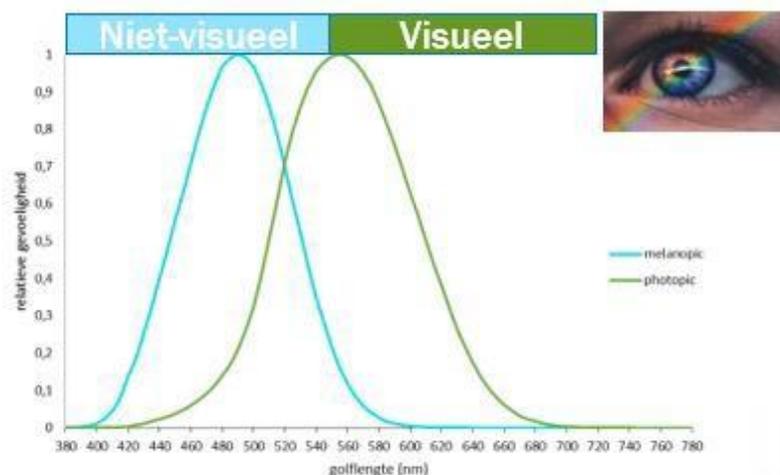


Figure 5: Courbe bleue gauche : courbe mélanopique de sensibilité oculaire des ipRGC. Vert droite Courbe : courbe de sensibilité oculaire photopique

MEDI

La nouvelle luminosité développée par la CIE (CIE S 026/E :2018) pour quantifier l'effet bien-être de la lumière sur l'homme est l'*éclairage mélanopique équivalent de la lumière du jour* (MEDI). Le symbole de **MEDI** est E^{D65} et l'unité est **lux**, tout comme l'éclairage photopique. Ce symbole peut être décomposé en plusieurs éléments :

Ev

« Ev » est le symbole de l'éclairage photopiquement pondéré, unité lux (abrégé lx). Dans le cas du MEDI, il s'agira de l'éclairage sur un plan vertical (les yeux) plutôt que sur un plan horizontal comme utilisé pour mesurer l'éclairage sur un bureau (éclairage horizontal de 500 lux). Là où nous voulons un éclairage photopique de 500 lux comme éclairage horizontal pour lire une feuille de papier, pour les aspects non visuels, il est important de regarder ce qui tombe sur l'œil, donc verticalement.

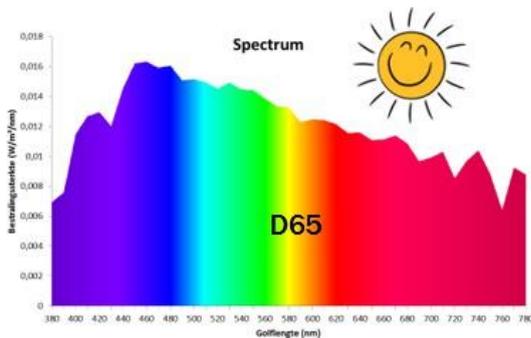
MEL

L'irradiance spectrale E_e est pondérée par la courbe de sensibilité mélanopique de l'œil (système non visuel). L'éclairage mélanopique est calculé de manière équivalente à l'éclairage photopique, où la courbe de sensibilité oculaire photopique $V(\lambda)$ est remplacée par la courbe de sensibilité oculaire mélanopique $S_{mel}(\lambda)$. De cette façon, il ne nous reste que les forces d'irradiation qui se trouvent à l'intérieur de cette courbe mélanopique non visuelle. Ainsi, les forces d'irradiance qui sont au pic de 490 nm auront le plus grand impact.

$$E_{v, mel} [lx] = 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_e \Phi_{mel}(\lambda) d\lambda [lx]$$

Cependant, l'éclairement mélanopique ne sera pas la quantité avec laquelle l'effet de la lumière sur le système mélanopique est exprimé. Pour cela, on utilise la quantité « MEDI », qui signifie « Melanopic Equivalent Daylight (D65) Illuminance » ou « Daylight (D65) Equivalent Melanopic Illuminance ». Il est donc encore nécessaire de convertir l'éclairement mélanopique afin d'obtenir cette nouvelle quantité avec la lumière du jour comme norme.

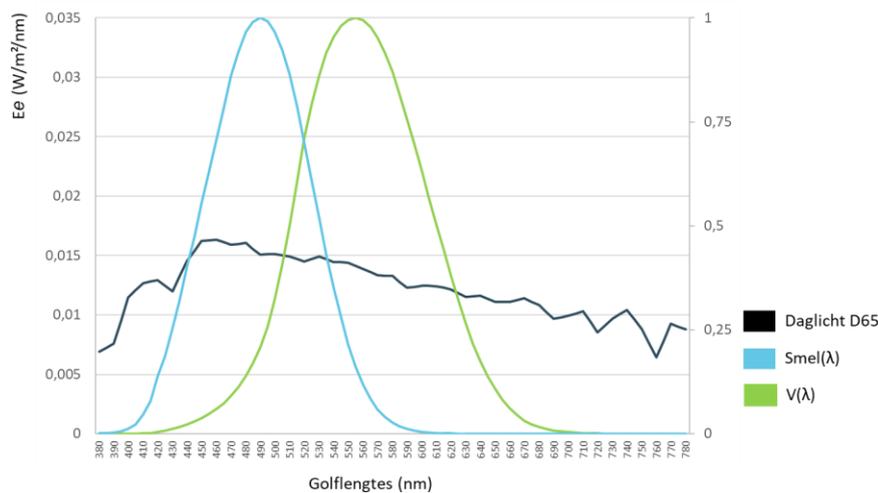
D65



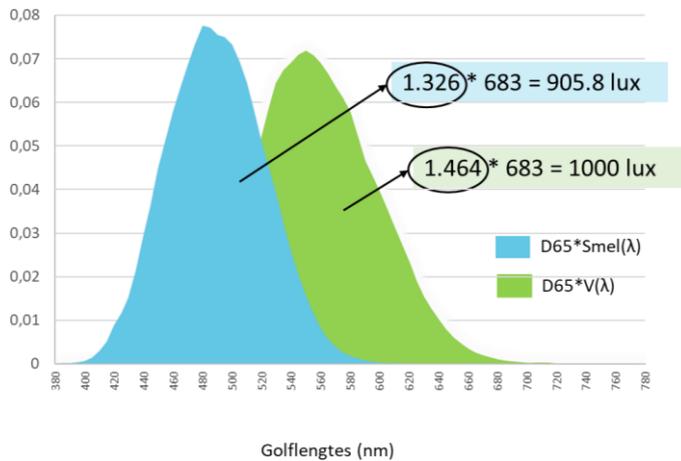
Dans le MEDI, la lumière du jour est prise comme référence car la lumière du jour est la source de lumière la plus importante de notre évolution pour contrôler notre système circadien (c'est-à-dire pour déterminer quand nous devons être actifs et nous endormir). La lumière du jour avec une température de couleur de 6500 K (=D65) est la valeur normalisée de la lumière du jour indiquée par la CIE (voir la figure 6 pour le spectre correspondant). Ce spectre est donc utilisé comme valeur de référence pour le calcul de l'IDEM.

Figure 6. Spectre normalisé de la lumière du jour D65 avec une température de couleur de 6500K qui est utilisée comme valeur de référence pour le MEDI.

Pour mieux comprendre cette conversion, nous distinguerons l'éclairement photopique et l'éclairement mélanopique qui tombe sur l'œil à la lumière du jour (voir figure 7a et 7b).



a)



b)

Figure 7 (a et b): Pesée phototopique et mélanopique de la lumière du jour

En raison de l'irradiance spectrale de la lumière du jour D65 $E_e(\lambda)$ avec la courbe de sensibilité oculaire photopique $V(\lambda)$ on obtient l' **éclairage photopique E_v de la lumière du jour**. Dans la figure 7, il s'agissait de 1000 lux.

$$E_{v} [\text{lx}] = 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda [\text{lx}] = 683 \times 1,4641 = 1000 \text{ lux}$$

Si nous mesurons l'irradiance spectrale de la lumière du jour D65 $E_e(\lambda)$ Cependant, la pondération avec la courbe de sensibilité oculaire mélanopique $S_{mel}(\lambda)$ nous obtenons 905,8 lux comme **éclairage mélanopique**.

$$E_{v, mel} [\text{lx}] = 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_e(\lambda) S_{mel}(\lambda) d\lambda [\text{lx}] = 683 \times 1,3262 = 905,8 \text{ lux}$$

Pour obtenir le MEDI (avec la lumière du jour en standard), l'éclairage mélanopique de la lumière du jour doit être multiplié par la constante 1,104 de sorte que l'éclairage mélanopique (905,8 lux) de la lumière du jour (D65) soit égal à l'éclairage photopique (1000 lux) de la lumière du jour (D65).

$$\frac{\text{Fotopische lux daglicht}}{\text{melanopische lux daglicht}} = \frac{1000 \text{ lux}}{905,8 \text{ lux}} = 1.104$$

1,104 est le facteur d'échelle constant grâce auquel l'éclairage mélanopique d'une source lumineuse peut être converti en MEDI avec la lumière du jour D65 comme référence. Pour obtenir le MEDI, il faut multiplier l'éclairage mélanopique par 1,104 à chaque fois afin qu'il soit comparé à la lumière du jour (D65).

$$E_{v, mel}^{D65} [\text{lx}] = 1,104 * E_{v, mel} [\text{lx}] = 1,104 * 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_e(\lambda) S_{mel}(\lambda) d\lambda [\text{lx}]$$



MEDI peut donc être traduit par la quantité de lux photopique de lumière du jour qui est nécessaire pour obtenir la même activation du système mélanopique non visuel (c'est-à-dire l'activation ipRGC's) comme l'activation provoquée par la source lumineuse/l'état d'éclairage actuel.

Étant donné que la lumière du jour D65 est la référence, l'éclairement photopique à la lumière du jour sera donc presque le même que le MEDI.

Calcul de l'illustration

Pour clarifier davantage la distinction entre grandeurs photométriques et mélanopiques, nous donnerons un exemple de source lumineuse (illuminant halogène A). Pour obtenir l'éclairement qui tombe sur l'œil, nous devons peser spectralement l'irradiance spectrale qui tombe sur notre œil $E_e(\lambda)$ avec la courbe de sensibilité oculaire $V(\lambda)$ du résultat qui nous intéresse (voir Figure 8).

Éclairement photopique

En multipliant l'irradiance spectrale par la courbe de sensibilité de l'œil photopique vert, on obtient 1000 lux d'éclairement photopique :

$$E_v, [lx] = 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda [lx] = 683 \times 1,464 = 1000 \text{ lux}$$

Éclairement mélanopique

Si nous voulons déterminer les effets non visuels sur le bien-être circadien, nous allons pondérer l'irradiance spectrale avec la courbe de sensibilité de l'œil mélanopique bleu. De cette façon, nous obtenons 449 lux comme éclairement mélanopique.

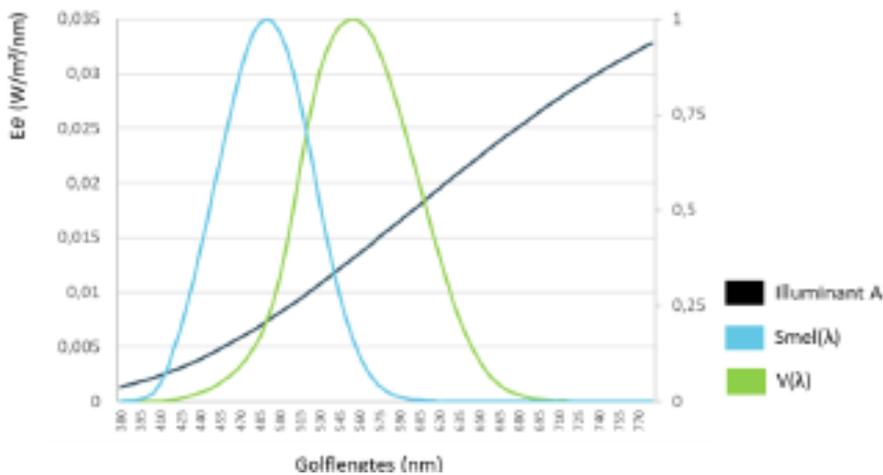
$$E_{v,mel} [lx] = 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_e(\lambda) \mathcal{S}_{mel}(\lambda) d\lambda [lx] = 683 \times 0,657 = 449 \text{ lux}$$

MEDI

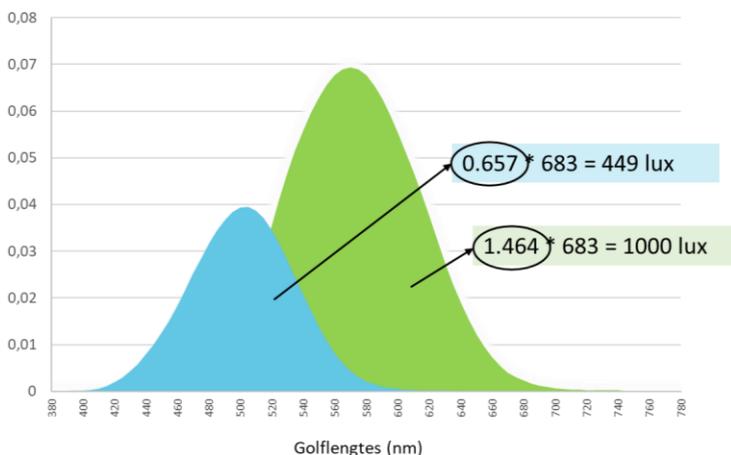
Le MEDI est ensuite obtenu en multipliant l'éclairement mélanopique (449 lux) par le facteur d'échelle 1,104 de la lumière du jour. De cette façon, nous obtenons 496 lux d'éclairement équivalent lumière du jour (=MEDI).

$$E_{v,med}^{D65} [lx] = 1,104 * E_{v,med} [lx] = 1,104 \times 449 \text{ lux} = 496 \text{ lux}$$

Alors que dans notre exemple avec l'illuminant A (éclairage halogène) nous avons besoin de 1000 lux, seulement 496 lux photopiques de lumière du jour D65 sont nécessaires pour obtenir le même lux mélanopique (= 449 lux) (c'est-à-dire la même activation des effets de lumière ipRGC / non visuels). L'illuminant A est caractérisé par une proportion relativement faible de longueurs d'onde courtes (bleu-cyan) par rapport à la lumière du jour, ce qui signifie que la MEDI obtenue (496 lux dans notre exemple) est inférieure à la valeur photopique du lux (1000 lux dans notre exemple).



a)



b)

Figure 8 : a) La courbe noire montre les intensités spectrales d'irradiance (W/m²/nm) pour les différentes longueurs d'onde d'une lampe halogène (illuminant A). Les courbes verte et bleue représentent la courbe de sensibilité oculaire photopique relative et la courbe de sensibilité oculaire mélanopique. **b)** Résultat de la pondération photopique (courbe verte) et de la pondération mélanopique (courbe bleue).

MDER

Une deuxième quantité de lumière mélanopique qui est importante pour quantifier l'impact de la lumière sur le système circadien est le **MDER** ou « Melanopic Daylight Efficacy Ratio » (le facteur d'efficacité de la mélanopsine). Le symbole de MDER est γ^{D65} . Il s'agit d'un facteur qui reflète le rapport entre le MEDI et l'éclairement photopique E_v .

$$\gamma_{v, mel}^{D65} = E_{v, mel}^{D65} / E_v$$

Nous pouvons déterminer le MDER des sources lumineuses. Le MDER indique l'efficacité d'une lampe à activer le système mélanopique non visuel par rapport à la lumière du jour. Plus le MDER est élevé, plus la source lumineuse activera le système mélanopique non visuel à la même quantité de lux photopique. Le MDER de la lampe dans l'exemple ci-dessus est de 0,496 (= 496 lux MEDI/1000 lux d'éclairement photopique).

Cela signifie que cette lampe n'est que deux fois moins efficace (49,6 %) pour activer le système mélanopique par rapport à la lumière du jour. L'éclairement photopique de cette lampe devrait donc être deux fois plus important pour avoir le même effet bien-être que la lumière du jour (MDER de $0,496 \times 2,02 = \text{MDER de } 1$). À la lumière du jour, le MDER est presque égal ou égal à 1, car la lumière du jour D65 est la source lumineuse de référence et est incluse dans la formule du MEDI. En conséquence, MEDI à la lumière du jour D65 a été assimilé à l'éclairement photopique. Si le MDER d'une lampe est égal à 1, alors pour un même éclairement photopique, l'éclairement mélanopique sera égal à celui de la lumière du jour. Les sources lumineuses avec un MDER élevé (même des valeurs supérieures à 1 sont possibles) peuvent être conçues en réglant et en optimisant le spectre de la lampe. Lorsque l'on se concentre sur les effets non visuels de la lumière (y compris les paramètres de bien-être au lieu du calcul traditionnel des périodes de récupération), il est conseillé de choisir des lampes avec des valeurs MDER variables et/ou élevées. Vous voyez également des fabricants de lumière développer des appareils avec un MDER de 0,85 avec de bonnes propriétés de rendu des couleurs. Il est également possible de développer des appareils qui ont un MDER variable à une température de couleur presque constante afin que le MEDI puisse être ajusté en fonction de l'heure de la journée. Néanmoins, cela n'est pas encore largement appliqué dans la pratique.

PARAMÈTRES D'ÉCLAIRAGE

CONCEPTION

Dans une conception HCL, il est important que les effets de la lumière sur le bien-être visuel et non visuel sur l'homme soient pris en compte. Dans la section ci-dessous, certains critères sont donnés qui sont importants lors de l'évaluation d'une conception d'éclairage afin que l'éclairage soit choisi qui maximise à la fois le confort visuel (critères visuels) et prenne en compte les critères non visuels (tels que la synchronisation du rythme circadien).

Paramètres visuels

Nous mentionnons ici à la fois les exigences légales minimales en matière de confort visuel incluses dans la EN12464-1 (la norme européenne pour l'éclairage intérieur des lieux de travail) et la préférence basée sur des recherches scientifiques antérieures. Dans la mesure du possible, il est donc préférable de rechercher la préférence visuelle plutôt que de se contenter de répondre de manière étroite aux exigences légales.



Température de couleur (CCT): température d'un hypothétique corps noir, dont le spectre donne la même impression de couleur que la source lumineuse. Unité = Kelvin (K)

- **Pendant la journée :**
3000-5500 Kelvin : (préférence = 4000-5000)
De plus, 6000 lux se sont avérés acceptables même dans le contexte du travail
- **Soirée :** à partir de 17h : 2700-3500 K



EN-12464-1: Répond à toutes les exigences de la norme EN12464-1



Rendu des couleurs : qualité de la couleur perçue des objets éclairés par cette source lumineuse. En plus de l'indice de rendu des couleurs Ra, il est également recommandé de calculer le TM30-15 :

- Index de Fidélité des couleurs : Fidelity index (Rf) > 75
- Index de saturation: Gamut index (Rg) > 99



Éviter l'éblouissement²: $UGR < 19$ (pour la plupart des applications)



Éclairage photopique horizontal:

- Par exemple dans un contexte de bureau : au moins 500 lux (préférence moyenne = 1000 lux)



Luminance : mesure de la luminosité ; la luminosité de la pièce est déterminée par la luminance des murs, du plafond, des meubles

- Répartition de la lumière : suffisamment de lumière sur le plan de travail et les murs, pas de murs trop sombres ou trop lumineux.
- Si 500 lux tombent sur la tâche de travail, 150 lux sur les murs est l'exigence minimale dans la nouvelle norme prEN12464-1 (2019), bien que la préférence soit plus élevée.



Effet stroboscopique/scintillement

- Scintillement : Modulation de la lumière visible. Unité = PST
 - $PST < 0.6$
- Effet stroboscopie : modulation de la lumière non visible. Unité = SVM
 - $SVM < 1$ continu, même avec gradation



Modélisation : rapport de l'éclairage cylindrique à l'éclairage horizontal en un ou plusieurs points

- 0,4 – 0,6

Paramètres non visuels

Bien qu'il n'existe pas encore de cadre juridique officiel contraignant, les paramètres d'éclairage non visuels ont récemment été inclus dans la norme de construction WELL, qui se concentre sur la santé et le bien-être des personnes dans les bâtiments. Ce système de certification des bâtiments décrit des critères spécifiques auxquels les bâtiments doivent répondre en termes d'air, d'eau, d'alimentation, de lumière, de mouvement, de confort thermique, d'acoustique, de matériaux, d'esprit et de communauté. Un certain nombre d'exigences sont minimales pour pouvoir obtenir le certificat. Selon la norme WELL, la recommandation optimale MEDI serait d'être exposé à 218 lux pendant quatre heures pendant la journée (à partir de midi au plus tard). Sur la base d'études scientifiques antérieures, nous avons ajusté le temps recommandé. Nous recommandons une exposition plus précoce à des niveaux élevés de MEDI parce que l'exposition du

² Évitez d'éblouir les luminaires, car l'éclairage requis est toujours plus élevé avec une conception d'éclairage HCL:

- Privilégiez une grande surface qui assure qu'il y a moins d'éblouissement afin que la luminance soit plus faible par m²
- Ajoutez un diffuseur microprismatique à l'appareil qui protège contre l'éblouissement d'un rayonnement opale plus lisse
- Utilisez un éclairage indirect (appareils suspendus ou lampadaires à contribution directe-indirecte), un éclairage mural (lèche-murs), des surfaces lumineuses,...

matin a le plus grand effet sur la synchronisation de notre système circadien. De plus, nous avons ajouté une plage MEDI au lieu d'une valeur limite, car l'effet de la lumière sur le bien-être dépend des différences individuelles (par exemple, l'âge, la taille de la pupille, etc.) et des paramètres de bien-être spécifiques (sommeil, vigilance, concentration, humeur) qui sont utilisés.

MEDI (Melanopic Equivalent Daylight Illuminance):



Dans la journée (6h -11h!):

- $E_{v,mel}^{D65} = 180-250$ lux pour les adultes
- $E_{v,mel}^{D65} = 360-500$ lux pour les personnes âgées (+70)



Soir/nuit (17 h-6 h : minimum 2 heures avant le coucher)

- transition lente vers $E_{v,mel}^{D65} < 50$ lux (Veuillez noter que SVM < 1)

Comment mesurer MEDI en pratique?

Le MEDI est toujours mesuré verticalement au niveau des yeux. MEDI n'est donc pas mesuré horizontalement ! Par exemple, sur le plan de travail d'un bureau (à 0,70 m), l'éclairage horizontal (par exemple 500 lux) est mesuré tandis que le MEDI de la personne travaillant sur le plan de travail est mesuré « verticalement incliné » (à 1,60 m debout ou 1,20 m assis). Idéalement, l'instrument de mesure doit également être incliné de 15° pour compenser le blocage d'une partie de la lumière par nos sourcils.

OPTION 1 : CONVERTIR AVEC UN LUXMÈTRE (EV X MDER = MEDI)

Lorsque l'éclairage photopique est multiplié par le facteur d'efficacité de la mélanopsine (MDER ; Rapport d'efficacité de la lumière du jour mélanopique) de la lampe, le MEDI est obtenu. Le MDER peut être demandé auprès du fabricant/fournisseur d'éclairage. Les valeurs typiques de MDER vont de 0,4 à 0,95. Plus le MDER est élevé, plus la lampe est efficace pour activer le système non visuel. Si le MDER = 1, cela signifie que la lampe est aussi efficace que la lumière du jour pour stimuler le photopigment mélanopsine (ex.: MDER Lampe fluo T8 840, 4000K = 0.59).

OPTION 2 : DIRECTEMENT AVEC LE SPECTROPHOTOMÈTRE

Cet appareil mesure l'irradiance par longueur d'onde et la pèse automatiquement pour la courbe de sensibilité oculaire mélanopique. Les résultats peuvent simplement être lus sur l'appareil (voir Figure 9).



Figure 9. Photospectromètre, incliné à 15°.

Personnaliser les embouts MEDI

Il existe plusieurs façons d'augmenter le MEDI. D'une part, toutes sortes d'ajustements peuvent être apportés à la conception de l'éclairage elle-même. D'autre part, le choix de l'intérieur, comme les couleurs de certaines grandes surfaces (par exemple, les murs, le sol) et du mobilier, a également un impact majeur.

Comment augmenter le MEDI grâce à la conception de l'éclairage?

Le MEDI est le résultat de la multiplication de l'éclairement photopique qui tombe au niveau de l'œil avec le MDER de la lampe. Ainsi, le MEDI augmentera en proportion directe à mesure que le MDER ou éclairement photopique augmente. Veuillez noter que la plus forte augmentation du MEDI sera obtenue par une augmentation de l'éclairement lumineux. Les luminaires à température de couleur variable (blanc réglable) sont souvent inadéquats si l'éclairement au niveau des yeux ne peut pas être suffisamment augmenté.



$MEDI = \text{Éclairage photopique appareil} \times MDER$

ASTUCE 1 : AJOUTEZ UN ÉCLAIRAGE INDIRECT ET DIFFUS

Un éclairage indirect ou très diffus avec une large surface permet d'apporter plus de lumière à notre œil grâce aux reflets. En voici quelques exemples :

- Éclairage latéral : appareils qui éclairent les murs (p. ex. lèche-murs, éclairage de corniche, spots près des murs)
- Luminaires avec une émission lumineuse orientée vers le haut réglable (généralement combinée à une émission lumineuse directe dirigée vers le bas) : en raison de la réflexion accrue du plafond et des murs, un éclairage plus indirect est créé (par exemple, suspensions, lampadaires/lampes de bureau)

CONSEIL N° 2 : AUGMENTER LE MDER

Choisissez des lampes avec suffisamment de cyan dans le spectre (généralement lié à une température de couleur plus élevée), par exemple des lampes de 5000 K. Bien que de nombreux fabricants d'éclairage pensent que 5000 K sont trop froids et désagréables, les recherches montrent que 5000 K est toujours considéré comme acceptable par les personnes dans un environnement de bureau (surtout en présence de lumière du jour). Attention : de plus en plus de fabricants de luminaires développent des LED optimisées qui leur permettent d'obtenir une température de couleur plus basse (ex : 4000 K) tout en ayant beaucoup de cyan présent dans le spectre. Ainsi, ces lampes ont un MDER élevé malgré la température de couleur plus basse. Il y a beaucoup d'évolution dans ce domaine.

ASTUCE 3 : AUGMENTER L'ÉCLAIREMENT PHOTOPIQUE

Choisissez des lampes avec un flux lumineux suffisamment important (par exemple 1000 lumens) pour augmenter l'éclairage photopique.

Comment augmenter le MEDI à travers l'intérieur?

En plus de la conception de l'éclairage, le design intérieur peut avoir un impact majeur sur les valeurs MEDI dans la pièce. Lors de la conception de l'espace, essayez d'augmenter les coefficients de réflexion (couleur) des grandes zones importantes dans le champ de vision.

ASTUCE 1 : UTILISEZ DES COULEURS AVEC DES VALEURS DE RÉFLECTANCE MÉLANOPIQUE ÉLEVÉES (VOIR FIGURE 10)

Choisissez des couleurs claires (nuances de blanc) et cyan car elles reflètent une grande partie de la lumière souhaitée. Pensez particulièrement aux grandes surfaces importantes dans le champ de vision : plafond, murs, sol, bureau/table, meubles, rideaux, nappe, etc.

ASTUCE 2 : ESSAYEZ D'ÉVITER LES COULEURS AVEC DE FAIBLES VALEURS DE RÉFLECTIVITÉ (VOIR FIGURE 10)

N'utilisez pas de noir ou de couleurs sombres, ni de rouge ou d'orange pour les grandes surfaces de la pièce. Ces couleurs absorbent une grande partie de la lumière souhaitée. Il y a alors moins de réflexion des longueurs d'onde cyan/bleu.

Colour Pigment	Cyan PB15:4	Yellow PY150	Orange PO71	Green PG36/38	Red PR254	Blue PB60	Violet PV23	Magenta MK8805
Reflectie Fotopisch	21,0%	72,6%	35,4%	37,8%	18,8%	9,0%	2,0%	22,9%
Reflectie Melanopsine	57,9%	36,0%	3,8%	48,9%	1,8%	33,7%	12,3%	17,5%



Figure 10. Exemples de coefficients de réflexion en fonction de la couleur. Le cyan reflète 57,9 % de mélanopsine, tandis que le rouge n'en reflète que 1,8 %.

Le rôle des architectes (d'intérieur) ne doit donc pas être sous-estimé. Lors de la conception d'un nouveau bâtiment, de nombreuses fenêtres peuvent également fournir suffisamment de lumière du jour. Faire entrer le plus de lumière naturelle possible dans la pièce est bien sûr aussi une bonne solution, car la lumière du jour est la source de lumière par excellence pour régler correctement notre horloge biologique ! Commencez toujours une conception à partir de la lumière du jour (en combinaison avec un système de contrôle solaire haute performance pour réduire l'éblouissement et la surchauffe) et complétez avec de la lumière artificielle si la lumière du jour est insuffisante.

COMMENT ÉVALUER UNE CONCEPTION HCL?

Lorsque vous décidez ou envisagez d'installer un éclairage HCL, vous souhaitez également savoir s'il y aura une amélioration significative pour les personnes par rapport à l'installation d'éclairage précédente ou différente. Afin de pouvoir se prononcer à ce sujet, il est nécessaire de mettre en place une étude d'évaluation, ce qui est peu probable dans la pratique. Après tout, la mise en place d'une étude décente demande beaucoup de temps et de main-d'œuvre. Les entreprises peuvent également demander des conseils (payants ou non) à des organismes de recherche ou à des établissements du savoir associés à des universités ou à des collèges. Dans le cadre de ce projet, nous avons évalué 2 cas d'HCL sur la base d'un ECR (ECR = essai contrôlé randomisé). Sur la base de ces expériences de recherche, nous souhaitons fournir un certain nombre de lignes directrices qui peuvent être prises en compte lors de la mise en place d'une étude d'évaluation. Afin de pouvoir faire une déclaration valable sur l'effet de l'éclairage HCL adapté, un **certain nombre de critères de base** doivent être remplis.

1

Un minimum de 2 mesures est nécessaire : 1 mesure avant réglage de l'éclairage et 1 mesure après réglage de l'éclairage. De cette façon, il est possible de vérifier s'il y a des changements dans les variables de bien-être mesurées.

2

En plus de questionner le groupe d'intervention qui peut bénéficier du rééclairage HCL (dans lequel le MEDI est optimisé), il est également nécessaire d'interroger un groupe témoin qui n'a pas eu de rééclairage HCL. Dans le groupe de contrôle, l'installation d'éclairage sera ajustée pour donner l'impression que l'éclairage a été optimisé sans réel changement dans le MEDI. De cette façon, il est possible de vérifier si les changements (positifs ou non) dans le bien-être peuvent vraiment être attribués au nouvel éclairage HCL ou s'ils peuvent plutôt être attribués à l'attente positive (par exemple, « notre bureau est en cours de construction, il doit donc être meilleur maintenant »). S'il y a un effet de bien-être tout aussi important dans le groupe témoin où le MEDI n'est pas ajusté, alors ceci sur la présence d'un effet placebo. Les effets positifs sur le bien-être sont alors le résultat d'un effet d'attente, d'un effet d'entraînement ou autre

les changements dans l'atmosphère de travail (comme un nouveau PDG) et non le résultat de l'ajustement de l'éclairage HCL.

Afin de pouvoir effectuer des analyses statistiques, l'objectif devrait être d'avoir un minimum de 30 personnes par groupe interrogées. Si cela n'est pas possible dès le départ, vous pouvez choisir de mener une recherche qualitative. Un plus petit nombre de personnes peuvent être interviewées de manière approfondie au sujet de leurs expériences, de leurs suggestions et de leurs commentaires. Cependant, cela ne permet pas une réelle évaluation de l'effet bien-être.

3

Un troisième facteur qu'une étude d'évaluation de la lumière doit prendre en compte est la période de l'année. Étant donné que la lumière du jour a également un effet sur les aspects non visuels de la lumière, elle peut également avoir une influence en fonction de la période de l'année (hiver/été). Si la post-mesure est plus proche de la période hivernale par rapport à la pré-mesure, l'effet de l'éclairage peut être annulé. Si la post-mesure se situe davantage vers la période estivale par rapport à la pré-mesure, l'effet du rallumage peut être augmenté de manière incorrecte. Idéalement, essayez de viser une pré et une post-mesure où les heures de lever et de coucher du soleil sont les mêmes. Par exemple, avant la mesure en octobre, après la mesure en février.

4

Un quatrième facteur qui peut être pris en compte est les différences individuelles des personnes interrogées. Certaines caractéristiques peuvent être des raisons d'exclure des personnes de l'étude (p. ex., troubles du sommeil et troubles oculaires connus, chronotype anormal, consommation de drogues, etc.). Pour d'autres caractéristiques, les analyses (en tant que covariables) peuvent être contrôlées, par exemple la taille de la pupille, l'âge, le sexe, certains médicaments, etc.

Adultes

Pour **les adultes** au bureau ou dans l'industrie, le matériel de test ci-dessous peut être utilisé. Ce ne sont là que quelques exemples. Il existe de nombreux autres tests et questionnaires qui peuvent être utilisés pour mesurer ces paramètres. Si vous souhaitez utiliser ces tâches, il est recommandé de collaborer avec des chercheurs spécialisés dans l'administration et l'analyse de ces tâches.

Sommeil et rythme circadien



Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) : Un questionnaire qui mesure la qualité subjective du sommeil. Les scores >5 indiquent une mauvaise qualité de sommeil. Le questionnaire comporte 7 parties à savoir : la qualité subjective du sommeil, la latence du sommeil, la durée du sommeil, l'efficacité du sommeil, les troubles du sommeil, Utilisation de somnifères et dysfonctionnement diurne au cours du dernier mois.



MotionWatch8 : Une montre de sommeil (accéléromètre) qui peut cartographier la quantité de sommeil, la qualité du sommeil (par exemple, la latence du sommeil, l'efficacité et la fragmentation du sommeil) et le rythme circadien (par exemple, la stabilité d'un jour à l'autre). Pour pouvoir analyser cela, le logiciel MotionWare est nécessaire.



Journal du sommeil : Un journal du sommeil est un ajout très utile à la montre de sommeil car il peut donner une image plus nuancée de la qualité du sommeil par nuit. Par exemple, on peut se demander à quel point les gens étaient satisfaits du sommeil de la nuit précédente, à quel point ils se sentent alertes au réveil et à quel point le sommeil était réparateur. De plus, le journal soutient également l'analyse de la montre de sommeil car il indique quand on s'endort et à quelle fréquence on s'est réveillé pendant la nuit. Les nuits au cours desquelles les gens indiquent qu'ils ont pris des somnifères peuvent également être utilisées de l'analyse de la surveillance du sommeil.

Fonctionnement cognitif



Échelle de somnolence de Karolinska (KSS): Estimation subjective de la façon dont les personnes se sentent alertes ou somnolentes à un moment donné (1 = très alerte et 9 = très somnolent, ayant de grandes difficultés à rester éveillé, luttant contre le sommeil).



Tâche d'attention D2 : test de stylo et de papier. Ce test en dit long sur la vigilance et la concentration (nombre de bonnes réponses - le nombre de mauvaises réponses). Il faut 4 minutes pour effectuer ce test, bien qu'il existe également des variantes qui permettent de manipuler la difficulté.



Tâche informatique Go-nogo : Tâche informatique qui mesure les temps de réaction. Ces temps de réaction en disent long sur la vigilance, la concentration et l'inhibition.



Tâche auditive Oddball : Il s'agit d'une tâche d'attention auditive qui mesure la vigilance et la concentration. Dans cette tâche, il faut réagir aux sons aigus le plus rapidement possible et ignorer les sons graves. Cette tâche peut également être complétée par une mesure ERP (Event Related Potentials) afin d'avoir une mesure du niveau de vigilance à la fois au niveau comportemental (vitesse de réaction) et au niveau neurologique (activation cérébrale en réponse aux tonalités sonores). Pour mesurer l'impact de la lumière sur la vigilance aiguë, cela peut être une tâche très utile car cette tâche auditive n'est pas affectée par l'impact visuel de la lumière.



EEG (Électro-encéphalographie): L'activation cérébrale générale (indépendante d'une certaine tâche) peut également être utilisée pour obtenir une image du niveau de vigilance. Par exemple, une réduction de l'activation cérébrale dans les fréquences teta et alpha (5-9Hz) peut être une indication de vigilance accrue.

Fonctionnement émotionnel



Positif Affect Negatif Affect Scale (PANAS): 20 items qui remettent en question les sentiments positifs (10 items) et les sentiments négatifs (10 items).



Burnout Assessment Tool (BAT): remet en question les différentes parties de l'épuisement professionnel, à savoir l'épuisement, la distance mentale, le dérèglement cognitif, le dérèglement émotionnel, les plaintes de tension psychologique et les plaintes psychosomatiques. Il existe des scores standard pour toutes les composantes.



Dépression Anxiété Stress Scale (DASS): Questionnaire de 21 (version courte) ou 42 (version longue) qui évalue le degré de symptômes de dépression, d'anxiété et de stress.

Personnes âgées

Pour les **personnes âgées**, atteintes ou non de démence, ou les résidents d'un centre de soins résidentiels, le matériel de test ci-dessous peut être utilisé. Encore une fois, ce ne sont là que quelques exemples. Il existe d'autres batteries de test qui peuvent être envisagées.

Sommeil et rythme circadien



MotionWatch8: Une surveillance du sommeil (accéléromètre) qui peut cartographier la quantité de sommeil, la qualité du sommeil (par exemple, la latence du sommeil, l'efficacité du sommeil et la fragmentation) et le rythme circadien (par exemple, la stabilité au fil des jours). Cependant, cela nécessite un logiciel spécial (MotionWare) pour pouvoir analyser cela. Veuillez noter que des sangles séparées sont fournies aux personnes atteintes de démence afin qu'elles ne puissent pas les enlever elles-mêmes.



Neuropsychiatric Inventory (NPI) : Sous-échelle de l'agitation nocturne et des troubles du sommeil : La NPI a été spécialement conçue pour les patients atteints de la maladie d'Alzheimer ou d'autres syndromes de démence. Dans la sous-échelle de l'agitation nocturne et des troubles du sommeil, la qualité du sommeil sera évaluée par un soignant qui connaît bien le patient

Fonctionnement cognitif



Mini-Mental State Examination (MMSE): outil de dépistage cognitif.



Addenbrooke's cognitive Examination (ACE-R): d'un dépistage cognitif complet qui comprend également le MMSE.



COgnitive Test Battery for Seniors (Cotess) : Évaluation complète pour tester le fonctionnement cognitif en profondeur, donnant une image nuancée des limites et des forces des fonctions cognitives individuelles. Cet instrument examine l'attention, l'orientation, la mémoire antérograde (apprentissage de nouvelles informations), la mémoire rétrograde (rappel ou reconnaissance à partir de la mémoire à long terme), le langage, la somatagnosie, la praxis, la pensée logique, les fonctions exécutives et la production de mots dirigés.

Fonctionnement émotionnel



Cornell Scale for Depression in Dementia (CSDD): questionne les différentes composantes de la dépression. Les questions sont remplies par un membre de la famille ou un soignant qui connaît bien la personne. Les composantes qui sont interrogées sont : les problèmes d'humeur, les troubles du comportement, les caractéristiques physiques, les fonctions cycliques et les perturbations du contenu de la pensée.



Cohen-Mansfield Agitation Inventory (CMAI): Demande à quelle fréquence l'agitation s'est produite au cours des 2 dernières semaines via 29 items. Les membres de la famille ou les aidants peuvent remplir ce questionnaire en fonction de leurs propres observations. Les composantes de ce questionnaire sont l'agitation physique et verbale (distinction entre l'agitation agressive et non agressive).

Comportements agressifs

C ONCLUSION

Chères lectrices, chers lecteurs,,

Ce document est le résultat final de deux années de recherche axée sur la pratique, à savoir le projet TETRA n° 180018 « Human Centric Lighting : Exploiting opportunities or anxiously waiting ? » financé par VLAIO. Le projet a été rendu possible grâce au soutien financier et technique des organisations suivantes (par ordre alphabétique) : Attentia, B.E.G., Boydens Engineering, Cebeo, DeltaLIGHT, Eloya, Encon, Esylux, Etap, F.E.E., Feilo Sylvania, G.I.A., Groen Licht Vlaanderen vzw, Helvar, IDEWE, Kreon, Liantis, LightConsult (HDM Systems), Lign, Luxendi, Motena, Nelectra, Odid, PITS Modular, Retail Office, Signify, Izegem, Techlink, Trilux, UZ Leuven, VIPA, Volta-Tecnolec, Volvo Trucks, WTCB et Zumtobel). Nous remercions ces organisations d'avoir rendu possibles de tels projets collectifs, y compris pour l'éducation des étudiants de Howest et de la KU Leuven.

Au début du projet, nous avons ressenti beaucoup d'intérêt pour cette thématique, mais aussi beaucoup d'hésitations et de questions. Il était nécessaire d'avoir des lignes directrices plus claires pour la conception des HCL, ainsi que de bonnes pratiques pour inspirer les gens. La combinaison de l'étude de la littérature et de l'élaboration de 2 cas HCL (industrie et centre de soins résidentiels), nous a permis de regrouper nos connaissances et nos expériences dans ce guide HCL. Nous espérons que ces informations pourront vous être utiles pour votre exploitation, ainsi que pour convaincre les sceptiques de se lancer dans HCL.

Nous pouvons d'ores et déjà conclure qu'il y a vraiment un avenir dans les HCL, même s'il reste encore un certain nombre d'obstacles à surmonter. Il n'est pas toujours facile de trouver un soutien suffisant parmi les investisseurs, car il est très difficile d'exprimer les effets sur le bien-être des HCL en chiffres exacts. Dans nos cas pratiques, nous avons toujours été en mesure de démontrer qu'une conception HCL ajoute de la valeur aux personnes qui peuvent en bénéficier. Les études de simulation montrent que le coût par rapport au bénéfice de bien-être est très minime. Nous sommes convaincus qu'au fil du temps, une conception HCL deviendra moins chère, car les concepteurs et les fabricants d'éclairage acquerront plus de connaissances, créeront une offre plus importante et il y aura également une plus grande demande de la part des clients. Nous avons tous un rôle à jouer à cet égard (entreprises, centres de soins résidentiels, hôpitaux, écoles, conseillers en prévention, ergonomes, fabricants d'éclairage, architectes, gouvernements, etc.). Bref, HCL n'est pas un battage médiatique, en route pour l'avenir !

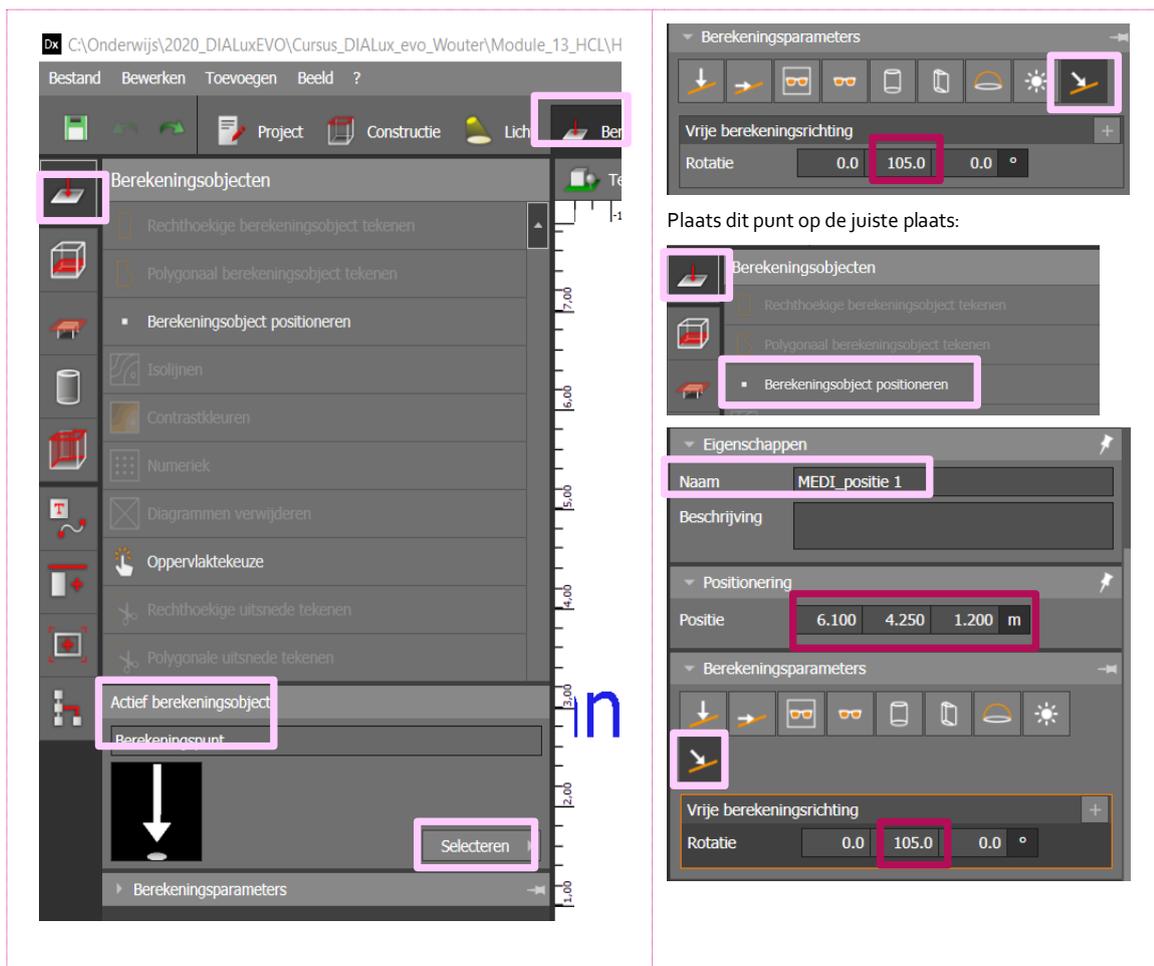
Sara Kindt, Lore Vandevivere (Howest) & Eowyn Van de Putte, Wouter Ryckaert (KU Leuven)

ANNEXE 1 | COMMENT TRAVAILLER AVEC MEDI DANS DIALUX ?

Si vous souhaitez obtenir de plus amples conseils sur le travail dans DIALux, vous pouvez suivre une formation chez Groen Licht Vlaanderen vzw. Ci-dessous, nous donnons un bref aperçu d'un module spécifiquement destiné à l'application de HCL dans DIALux.

Comment calculer MEDI dans DIALux ?

Malheureusement, le calcul de MEDI n'a pas encore été implémenté dans DIALux evo, bien que cela changera certainement à l'avenir. Le MEDI doit donc être calculé à l'aide du MDER comme étape intermédiaire, par exemple avec un **point de calcul libre**. Dans DIALux également, nous devons prendre en compte les sourcils qui bloquent une partie de la lumière. Par conséquent, il est nécessaire d'introduire une rotation de 105° , ce qui correspond à une direction d'incidence de la lumière de 75° . Pour prendre la lumière à hauteur des yeux, on choisit généralement 1,20m et ce par exemple à l'emplacement d'une chaise de bureau d'un employé en question (voir image).



Une autre façon de visualiser la lumière au niveau des yeux est de demander un **point de calcul cylindrique**. L'inconvénient ici est que l'inclinaison de 15° ne peut pas être effectuée, vous obtiendrez donc une surestimation de l'éclairement lumineux.

Une vue 3D du point de calcul libre:



Exemple de résultat :

MEDI_positie 1			
		60.4 lx	
Berekeningspunt (Vrije berekeningsrichting)			
	Is	Moet	
Totale verlichtingssterkte	60.4 lx	-	
Directe verlichtingssterkte	0.00 lx	-	
Parameters			
Hoogte	1.20 m		
Rotatie	0.0	105.0	0.0 °

Après réception de la sortie dans DIALux, les valeurs de lux 'normales' (= valeurs de lux photopiques) doivent encore être converties en valeurs MEDI. Cela peut être fait **en multipliant l'éclairement photopique par la valeur MDER**.



Par exemple : $60,4 \text{ lux (sortie DIALux)} * 0,6 \text{ (valeur MDER fictive)} = 36 \text{ lux MEDI à hauteur des yeux}$

Remarque : 36 lux MEDI est beaucoup trop faible dans un contexte de bureau. Pendant la journée et certainement le matin, nous visons des valeurs de 250 lux MEDI au bureau. Le soir, cette valeur serait bonne, car nous visons alors 50 lux MEDI ou moins.

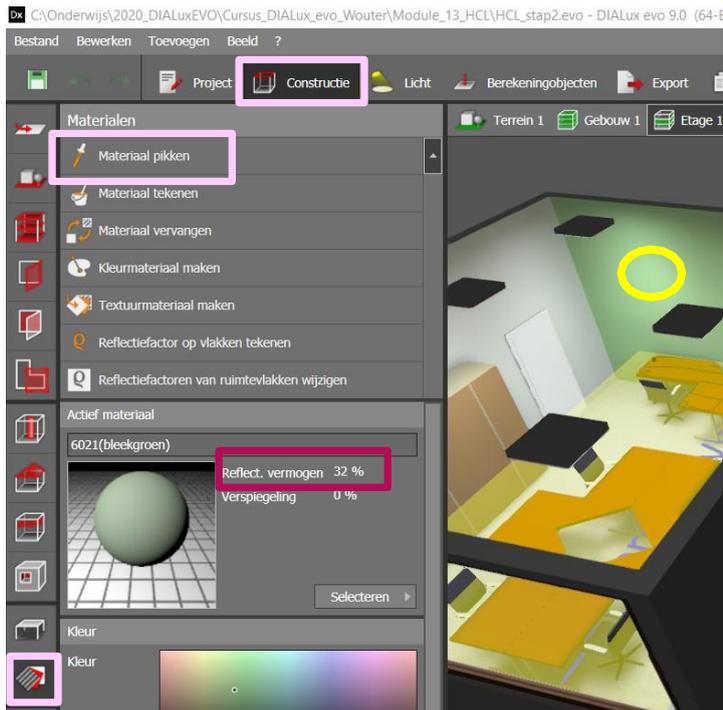
La lumière blanche froide a un MDER plus élevé que le blanc chaud. De cette façon, on peut « accorder » mieux et plus finement en sélectionnant une lumière plus froide le matin pour augmenter le MDER et en sélectionnant une lumière plus chaude vers le soir pour diminuer le MDER.

Les reflets jouent un rôle important dans la réception de plus de lumière sur les yeux. Les éléments suivants peuvent donc aider à atteindre des valeurs MEDI plus élevées :

- A. Réglage du coefficient de réflexion du mur
- B. Ajout de lèche-murs
- C. Réglage du coefficient de réflexion de la surface de travail
- D. Ajouter un lampadaire

A. RÉGLAGE DU COEFFICIENT DE RÉFLEXION DU MUR

Via 'Pick material', vous pouvez voir la couleur des murs dans DIALux. Dans cet exemple, le coefficient de réflexion est de 32 %. C'est relativement faible, alors qu'il s'agit toujours d'un plan important dans le champ de vision des personnes présentes dans cette pièce. Étant donné que la sensibilité mélanopique s'est déplacée un peu plus vers la zone bleue par rapport à la sensibilité photopique bien connue, il est préférable de prendre des couleurs neutres (blanc) ou des couleurs claires avec une teinte bleue afin que le spectre mélobolique se reflète davantage vers les yeux.



La couleur du mur peut être modifiée via le catalogue de couleurs dans DIALux, puis « Matériau de dessin » (par exemple, de « vert – 32 % » à « RAL 9010 (blanc pur) » – 86 %).

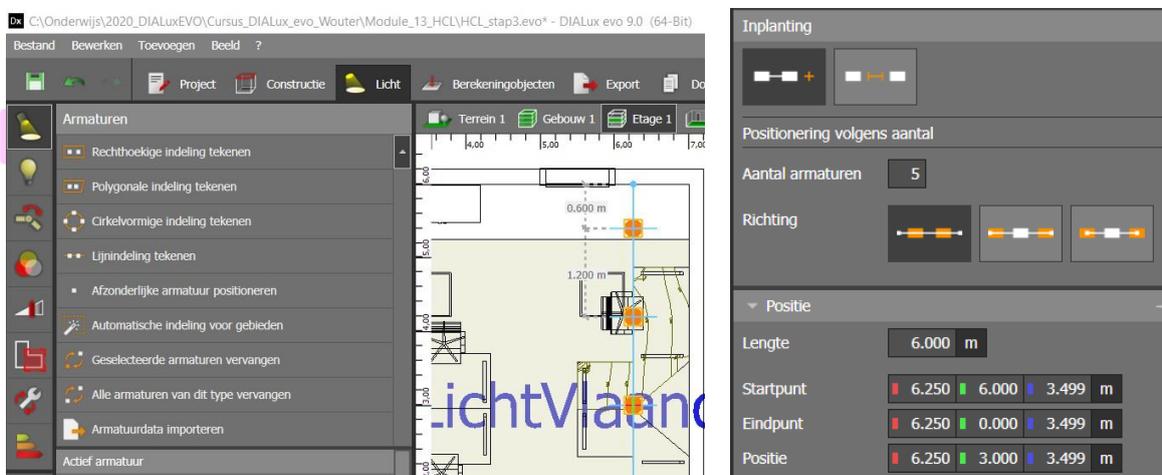


Résultat : changer la couleur du mur :

$148 \text{ lux (DIALux de sortie)} * 0,6 \text{ (valeur MDER fictive)} = 89 \text{ lux MEDI à hauteur des yeux}$

B . AJOUT du WALLWASHERS

Une deuxième façon d'augmenter les reflets est d'ajouter des wallwashers dans le design DIALux. Pour la source lumineuse, vous pouvez choisir 'Wallwasher' puis choisir 'line layout'. Il est important de vérifier que les lumières sont bien orientées vers le mur (voir illustration).





Ajout du résultat wallwasher:

$260 \text{ lux (output DIALux)} * 0.6 \text{ (valeur fictive du MDER)} = 156 \text{ lux MEDI à hauteur des yeux}$

C. RÉGLAGE DU COEFFICIENT DE RÉFLEXION DE LA SURFACE DE TRAVAIL

De la même manière que pour régler la couleur du mur, la couleur (et donc le coefficient de réflexion) de la surface de travail peut également être ajustée. Cela peut se faire via le « catalogue de matériaux » (par exemple de « Brun rougeâtre cerise – 7 % de réflexion » à « Bouleau laqué – 70 % »).



Réglage du résultat de la couleur de la surface de travail (avec wallwasher):

$459 \text{ lux (output DIALux)} * 0.6 \text{ (valeur fictive du MDER)} = 275 \text{ lux MEDI à hauteur des yeux}$

Résultat de l'ajustement de la couleur de la surface de travail (sans wallwasher):

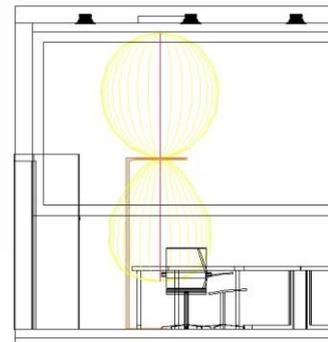
$255 \text{ lux (output DIALux)} * 0.6 \text{ (valeur fictive du MDER)} = 153 \text{ lux MEDI à hauteur des yeux}$

D. AJOUT D'UN LAMPADAIRE

Une quatrième façon d'augmenter les reflets au niveau des yeux (et donc les valeurs MEDI) est d'ajouter des lampadaires.

En plus des lampadaires, des luminaires suspendus peuvent bien sûr également être ajoutés au design, car ces luminaires peuvent également fournir un éclairage plus indirect en raison de la réflexion accrue à travers le plafond et les murs.

Le choix dépend, entre autres, de la hauteur de la pièce



Ajouter le résultat lampadaire:

$1076 \text{ lux (output DIALux)} * 0.6 \text{ (valeur fictive du MDER)} = 634 \text{ lux MEDI à hauteur des yeux}$

COMMENTAIRES SUR L'EXEMPLE UTILISÉ

La lumière du jour n'a pas été prise en compte dans cet exemple de conception. Néanmoins, la lumière du jour est très importante : en tant qu'humains, nous préférons la lumière du jour. L'intensité est également si élevée que les valeurs MEDI requises sont facilement obtenues. Il est donc important d'amener la lumière du jour le plus loin possible dans la pièce et de faire un bon choix de contrôle du soleil (pas d'assombrissement mais laisser passer la lumière et garder la chaleur à l'extérieur autant que possible).

Comment faire fluctuer MEDI dans DIALux ?

Comme décrit dans les paramètres d'éclairage (cf. guide HCL « 3. Paramètres d'éclairage HCL design »), il est également important d'abaisser les valeurs MEDI vers le soir. Pour les personnes qui ont un rythme normal (par exemple, pas de travail posté ou de nuit), le MEDI peut être de 250 lux pendant la journée et passer lentement à MEDI < 50 lux à partir de 17 heures le soir.

Le contrôle de l'éclairage permet de régler différentes situations (scènes lumineuses) afin que le niveau MEDI souhaité puisse être ajusté aux différentes exigences du matin (250 >) et du soir (50 <). Quelques exemples :

Exemple 1 : dalles LED uniquement

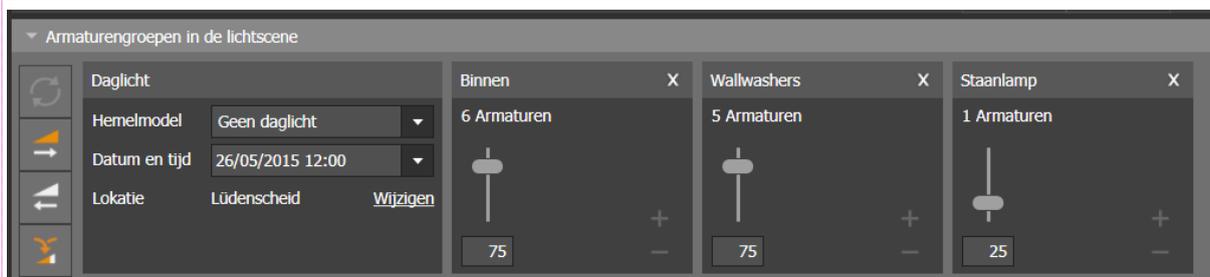


Object	Value	Unit	Other
Berekeningen	522	lx	0.00
Bureautafel positie 1	107	cd/m ²	0.59
	493	lx	0.59
MEDI_positie 1	223	lx	-

Conclusion:

- l'éclairage n'est tout simplement pas suffisant.
- $MEDI = 223 \text{ lux} * 0,6 \text{ (MDER)} = 134 \text{ lx}$ est trop faible pour la journée.

Exemple 2 : Contrôle de l'éclairage optimisé pour une utilisation de jour



Kantoor_GroenLichtVlaanderen			
Berekeningen			
	512 lx	0.045	
Bureautafel positie 1			
	175 cd/m ²	0.76	
	802 lx	0.76	
MEDI_positie 1			
	469 lx	-	

Conclusion:

- Éclairage suffisant
- $MEDI = 469 \text{ lx} \times 0.6 \text{ (MDER)} = 280 \text{ lx} (>250 \text{ lx dus ok})$
- 800 lx sur le bureau, les autres tables en moyenne 512 lx

Exemple 3 : Contrôle de l'éclairage optimisé pour la soirée

▼ Armaturengroepen in de lichtscene

Daglicht	Binnen	Wallwashers	Staanlamp
Hemelmodel: Geen daglicht	6 Armaturen	5 Armaturen	1 Armaturen
Datum en tijd: 26/05/2015 12:00	100	10	0
Lokatie: Lüdenscheid Wijzigen			

Kantoor_GroenLichtVlaanderen			
Berekeningen			
	535 lx	0.00	
Bureautafel positie 1			
	116 cd/m ²	0.60	
	532 lx	0.60	
MEDI_positie 1			
	241 lx	-	

En conclusion :

- Éclairage suffisant
- $MEDI = 241 \text{ lx} \times 0,6 \text{ (MDER)} = 145 \text{ lx}$. Pour le travail de nuit, c'est plutôt élevé.

ANNEXE 2 | SYSTÈME CIE POUR LA MÉTROLOGIE DU RAYONNEMENT OPTIQUE POUR LES RÉPONSES INFLUENCÉES PAR L'IPRGC À LA LUMIÈRE

Consultable sur le [site de la CIE](#).