

## Application de l'optique diffractive pour un appareil de luminothérapie : la Luminette ®

Nos grands-parents le savaient et, avant eux, leurs grands-parents. « *Il fait beau, allez jouer dehors, profitez du soleil* ». D'expérience, ils pressentaient les bienfaits de la lumière pour leurs rejetons. Même s'ils ignoraient jusqu'à l'existence de la glande pinéale ou épiphyse, dernière des glandes endocrines dont la fonction fut identifiée dans les années '80. Elle était tout de même connue de quelques-uns même s'ils en ignoraient les vertus. L'épiphyse était déjà évoquée par le philosophe René Descartes qui y voyait le « siège de l'âme ». Les mentors des vertus du Yoga pressentaient également son importance. Ces adeptes des mythologies védiques y voyaient en effet le siège du mythique « troisième œil ». La science a confirmé récemment le pressentiment de nos aïeux et a permis de déterminer que l'épiphyse produisait une substance dérivée de la sérotonine, la mélatonine.

Présente dans le cerveau et dans le système digestif, la sérotonine est, elle, une molécule impliquée dans la régulation de fonctions telles que la thermorégulation, les comportements alimentaires et sexuels, la douleur, l'anxiété, le contrôle moteur et... le cycle veille-sommeil.

Selon le professeur Robert Poirrier, du Service de Neurologie du CHU de Liège, (Ulg), « *le marqueur de temps principal chez l'homme, comme chez nombre d'animaux, est une lumière blanche assurant un éclairage intense (plus de 2.000 lux). La lumière, à cette dose, agit ainsi sur le noyau suprachiasmatique (notre horlogerie biologique interne, NDLR) et gouverne les grands rythmes circadiens principaux (température, rythme cardiaque, activité motrice, vigilance, humeur, activités cognitives, rythme du cortisol, ...). Elle assure la mise régulière en phase des maxima et des minima de ces rythmes avec le cycle nyctéméral du jour et de la nuit et permet une optimisation de ces fonctions dans leurs rapports avec les comportements de jour et de nuit. La photothérapie agit dans son principe comme moyen de renforcement de cette optimisation. Le noyau suprachiasmatique agit à son tour sur toute une série de structures cérébrales et en particulier sur l'hypothalamus et l'hypophyse. Il agit encore sur l'épiphyse par les voies d'un circuit complexe (hypothalamus, tronc cérébral, voie orthosympathique du ganglion cervical supérieur). De ce fait, il module la production nocturne de mélatonine. C'est par le biais de ce circuit que la lumière vive (de plus de 2.000 lux) bloque cette sécrétion.* »

C'est alors à la sérotonine de jouer : « *La sérotonine est une neuro hormone clé de notre fonctionnement général, explique Ir Emil Galetic. Elle est la base de notre activité, de notre bon stress. Il faut un niveau de sérotonine convenable pour se sentir en forme* ».

La mélatonine, entre autres actions, modifie en retour la périodicité de l'activité du noyau suprachiasmatique. « *En période d'obscurité prolongée, en hiver, poursuit le professeur Poirrier, elle allonge sa période. En été, elle la raccourcit. Sous nos latitudes et dans nos environnements sociaux, modernes, l'absence de stimulation lumineuse suffisante, en particulier quand les nuits s'allongent, peut avoir pour conséquence des difficultés d'adaptation, des désynchronisations de nos rythmes internes par rapport au milieu.*

Pour agir de manière efficace sur le noyau suprachiasmatique, la quantité de lumière à appliquer varie selon le moment de la journée. Au minimum, le matin, il faut obtenir et maintenir au niveau des yeux un éclairage de 2.500 lux pendant 2 heures au moins. En

automne et en hiver, être exposé à ce niveau minimum reste encore possible lorsqu'on vit à l'extérieur; cependant, nombre de gens dans nos sociétés modernes ne peuvent accéder à ces expositions de lumière en raison notamment de leur mode de vie.

L'effet des doses varie avec la durée de l'application. En fait, une relation inverse a été montrée entre la quantité d'éclairement et sa durée. Ces travaux montrent que la dose de 10.000 lux pendant 1/2 heure équivaut à celle de 2.500 lux pendant 2 heures.

$Q = E.t = Cte (lx.h) = 5000 \text{ lx.h}$  dans l'exemple

De jour comme de nuit, le moment auquel a lieu l'exposition à une forte lumière joue également un rôle capital. Une application de lumière à midi a peu d'effet. Une application le soir retarde, dans les jours qui suivent, le maximum de la courbe de température interne et l'heure de l'endormissement. Un individu soumis à ce régime ira spontanément dormir plus tard. Il retardera "sa phase" d'endormissement.

A l'opposé, une application matinale précoce entraîne au cours des jours qui suivent un effet inverse, soit une avance horaire du maximum de la courbe de température interne et de l'irruption du sommeil lors de la soirée qui suit. La tendance est donc, sous ce régime, à aller dormir plus tôt et à se lever dès l'aube, le lendemain. On parle dans ces conditions d'une "avance" de phase. Cette influence du moment de l'application de la lumière constitue ce qu'il est convenu d'appeler "la courbe de réponse de phase".

On reconnaît actuellement qu'il existe de nombreuses situations anormales qui peuvent relever d'une description physiopathologique en termes de troubles du rythme circadien.

On estime qu'un syndrome connu comme la **Dépression Hivernale**, appelé aussi **Trouble Affectif Saisonnier**, serait lié à un allongement et à une perte d'amplitude trop importante des rythmes endogènes induits par le noyau suprachiasmatique, en particulier au niveau du contrôle hypothalamique des fonctions endocriniennes. L'insuffisance d'éclairement, résultant de l'allongement des périodes d'obscurité, aboutirait à cette modification du fonctionnement de ces structures.

Nombre d'insomnies relèvent également de ce genre de perturbations. Certains sujets ne parviennent pas à s'endormir la nuit. Ils ne trouvent le sommeil qu'aux petites heures, parfois même à des instants où ils doivent normalement participer à des activités sociales. Inversement, on rencontre, souvent chez les personnes âgées, une tendance à aller dormir trop tôt et à se lever très tôt pendant la nuit.

Il existe aussi des individus qui se décrivent de façon chronique ou constitutionnelle comme des sujets du soir ou des sujets du matin. Ils ne se plaignent pas de troubles du sommeil dans la mesure où ils ont la liberté de répartir leurs activités sur le jour et la nuit en fonction de leur tendance naturelle. On parle alors de variations endogènes normales ou de typologies du rythme veille-sommeil.

A côté de ces situations particulières, la société voit s'accroître le nombre de personnes soumises à des décalages chroniques du fait de leurs activités professionnelles ou de voyages transméridiens fréquents.

On reconnaît enfin de franches pathologies organiques où l'on observe une déstructuration de l'activité circadienne comme dans le vieillissement anormal, la démence ou diverses maladies chroniques qui affectent la vision et entraînent une fatigue importante.

### **La luminothérapie pour rétablir un taux satisfaisant de sérotonine**

La lumière, on l'a vu, est essentielle. Faute de période lumineuse naturelle suffisante, la lumière artificielle, sous une quantité de lumière suffisante et de longueur d'ondes qui la rapproche de la couleur bleue, peut agir à titre thérapeutique (**traitement de Luminothérapie**).

*« Vouée à combattre l'effet dépressif résultant du manque de lumière caractéristique de l'hiver, la luminothérapie est connue du grand public depuis plusieurs années, notamment sous la forme de grands écrans blancs, explique Dr Yvon Renotte, professeur invité au HOLOLAB, département de physique - ULg. Ces diffuseurs de lumière ont des effets similaires à ceux de la lumière naturelle, synchronisant nos rythmes biologiques circadiens qui maintiennent notre équilibre veille-sommeil. Ils présentent néanmoins un inconvénient majeur: il faut s'armer de patience pour rester un temps suffisant face à l'écran. Dans les années '90, la firme liégeoise Schröder S.A., avec l'aide du docteur Robert POIRRIER du Centre Hospitalier Universitaire de Liège (CHU), mit au point un casque à visière lumineuse. Mais ce dispositif n'était pas tout à fait confortable ».*

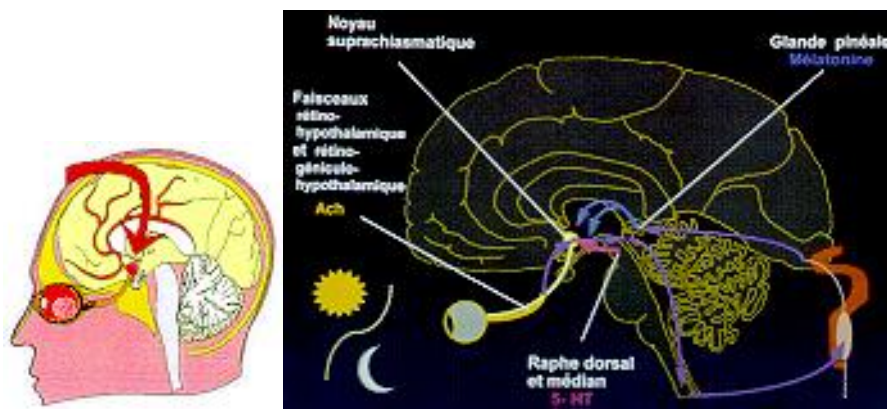


Figure 0 : principe du traitement par luminothérapie

### **La Luminette ®**

Avec l'aide de la Région Wallonne (Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie), Schröder S.A. et des chercheurs de l'Université de Liège, le Prof. Robert POIRRIER du CHU, et les Drs Yvon RENOTTE et Vincent MOREAU du HOLOLAB, ont développé un dispositif innovant dont le brevet fut pris par la société Schröder.

Une spin-off liégeoise dénommée, Lucimed s.a, fut créée pour exploiter et distribuer ce nouveau concept et ainsi est née « **la Luminette ®** » ; **produit innovant au design exceptionnel. (création :J.Tilman de Inov sprl)**

L'innovation du système réside dans la portabilité des diffuseurs de lumière et dans l'exploitation de technologies photoniques telles que l'holographie et la micro-optique. En effet, il s'agit d'une simple paire de lunettes qui, comme le soleil, fait pénétrer la lumière dans l'œil jusqu'aux zones de la rétine les plus favorables au traitement, tout en conservant une vision quasiment parfaite de l'environnement.

La Luminette® est un produit qui met en œuvre un composant particulier, dont le comportement exploite les propriétés de optique diffractive (DOE : Diffractive Optical Element – cf.infra). Réalisé sur base d'un système holographique, ce composant diffracte la lumière émise par des sources LEDs placées sur la tranche supérieure de la visière et garantit l'émission d'un spectre proche de la lumière naturelle, lequel sera focalisé et concentré d'une façon optimale dans l'œil du patient au niveau inférieur de la rétine, assez largement hors de la zone imageante de cette dernière (voir figure 1).

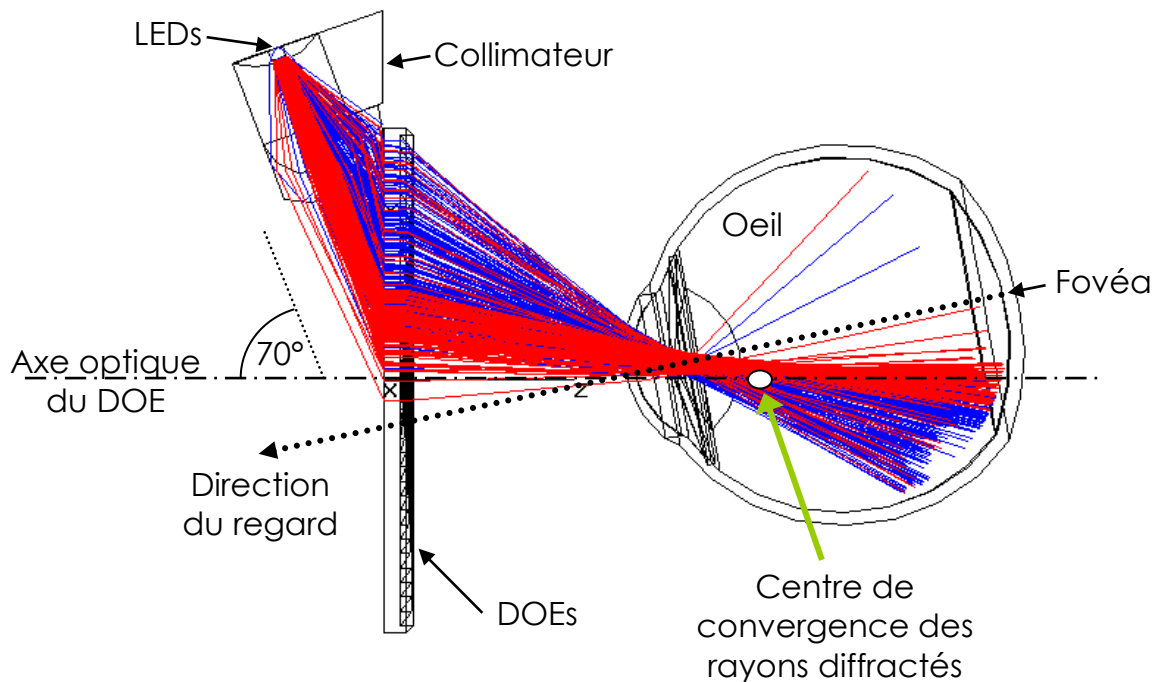


Figure 1 : Géométrie et fonctionnement du dispositif d'éclairage

## Définition du principe holographique

### L'optique diffractive

Les éléments optiques diffractifs (DOEs) sont une nouvelle classe de composants optiques dont le fonctionnement repose sur le principe de la diffraction. En traversant un milieu microstructuré, le front d'onde lumineux incident est fractionné en une multitude d'ondellettes secondaires qui, en se recombinant vont former un front d'onde complètement nouveau.

## Lentille diffractive hors-axe

Le dispositif de distribution d'éclairage exploite les propriétés remarquables des DOEs. Une lentille diffractive hors axe, épousant la forme d'un verre de lunette, est utilisée pour focaliser, à travers et un peu derrière la pupille du patient, la lumière émise par une série de diodes électroluminescentes (LEDs). Ces dernières sont placées en dehors du champ de vision de l'utilisateur et dirigées vers le composant sous incidence rasante, via un système de collimation adapté (cf. Figure 2a).

La lentille diffractive utilisée est dite « hors axe » car elle ne répond pas aux caractéristiques des lentilles réfractives classiques. En effet, le point focal de cet élément (lieu de convergence des faisceaux incidents parallèles à l'axe optique) n'est pas situé sur l'axe optique.

Par contre, les faisceaux qui rencontrent l'élément sous une incidence de  $70^\circ$  (cf. figure 1) se croiseront sur l'axe optique, en un point situé légèrement en arrière de la pupille. La propriété de convergence des faisceaux entrant dans le globe oculaire permet d'éclairer une surface étendue sur la rétine.

Notons enfin que la fovéa, région de la rétine qui permet la vision fine, n'est pas éclairée par le dispositif et reste donc disponible pour toute une série d'activités qui ne font pas appel à la vision périphérique (lecture, travail sur écran, déplacement dans un environnement sécurisé, ...).

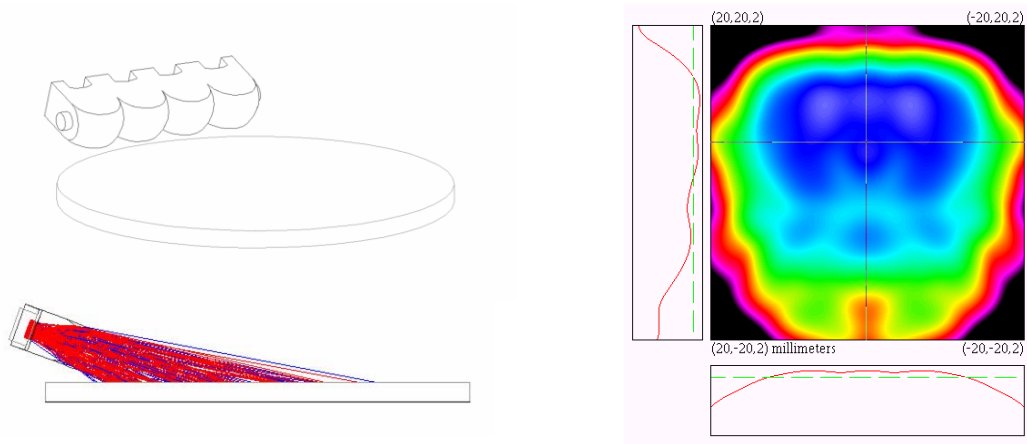
### **La source lumineuse – Les diodes**

Les diodes électroluminescentes présentent les caractéristiques souhaitées pour l'application développée : leur rendement énergétique (puissance émise/puissance consommée) est l'un des plus intéressants parmi les différents types de sources lumineuses disponibles.

#### Spécifications techniques: données du fournisseur PCB

Tension nominale:	1.2 Volts (1 pile standard AAA) - 1000mAh
Puissance consommée:	1.1 watts
Intensité lumineuse :	800 m-candelas
Flux lumineux des sources:	2400 m-lumens
Autonomie :	1 heure
Source:	8 LEDs (diodes Electro-Luminescente) de 0.1 watts

La répartition optimale du flux émis par les photodiodes sur le composant diffractif est extrêmement importante. « *Nous avons étudié et réalisé un composant optique dont le rôle est d'étendre et de collimater le flux émis par quatre diodes disposées côte à côte, expliquent les concepteurs de la Luminette ®. Le design retenu minimise l'encombrement de cet élément grâce à l'utilisation de micro- lentilles* »



*Figure 2 : Géométrie de l'élément de collimation et distribution de l'éclairement incident au composant diffractif.*

## 1) Validation (Mesure) de l'énergie émise par modélisation

### a) Efficacité Energétique par modélisation

Les simulations théoriques effectuées sur base d'une modélisation du système par tracés de rayons ont permis d'obtenir des cartes de l'éclairement rétinien pour différents axes d'orientation de l'œil. Les relevés ci-dessous (figure 3) correspondent respectivement à une orientation de la direction du regard de  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  et  $15^\circ$  sous l'axe optique du composant diffractif.

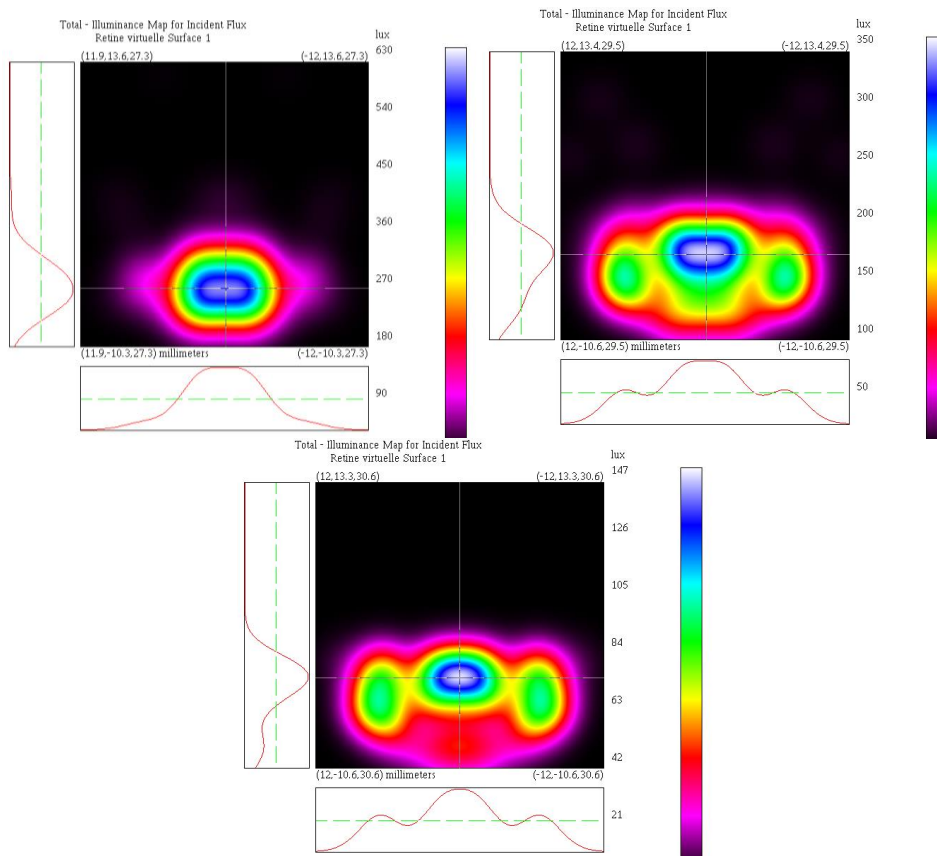


Figure 3 : Cartes d'éclaircements rétiens en fonction de l'inclinaison verticale du globe oculaire par rapport à l'horizontale : a) 0° ; b) 10° ; c) 15°

### b) Efficacité spectrale- Efficacité énergétique

« Sur la figure 4, nous voyons la courbe d'émission spectrale de la Luminette® pour les caractéristiques données à notre système (Leds+hologramme). **On constate une large dominance des « photons bleus »** (les plus énergétiques et les plus efficaces) avec une longueur d'onde maximale = 468 nm. »

Ces résultats proviennent de mesures spectrales du système diffractif holographique de la Luminette®.

Provincio et al. ont démontré en 2000 que le chromophore associé à cette longueur d'onde est une **variété de mélanopsine** qui se situe **dans les cellules ganglionnaires de la rétine**. Sur le croquis (figure 4) ci-dessous nous pouvons voir que cette **longueur d'onde correspond à un maximum d'efficacité sur la courbe de blocage de la sécrétion de mélatonine**.

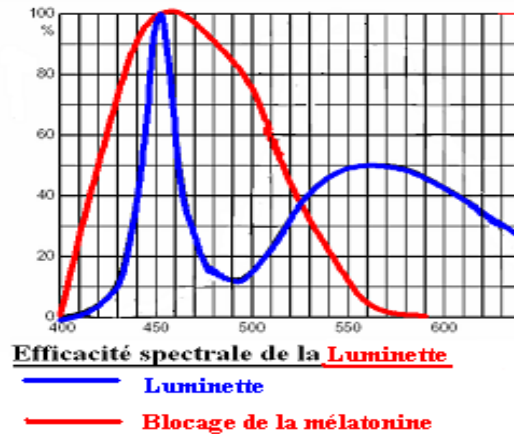


Figure 4 : Spectre de la Luminette®

Les recherches récentes montrent que, vis à vis des récepteurs rétiniens, **l'efficacité est maximale et permet ainsi un traitement de plus courte durée.**

La littérature stipule que pour un traitement efficace, un flux lumineux ~~émis~~ assurant **un éclairage compris entre 550 et 650 microwatts / cm<sup>2</sup> doit arriver sur la cornée.** C'est le niveau efficient minimum pour traiter les dépressions saisonnières. (Glickman – Byrne – Pineda – Hauck – Brainard, in *Biological Psychiatry*, 59(6), 15 mars 2006, pp. 502-7, (voir figure 6)

L'éclairage rétinien (correspondant à l'intégrale de l'éclairage [lux] sur la surface de la rétine) évolue avec l'orientation de l'œil, il passe par un maximum lorsque celui-ci est incliné à 10° vers le bas. Cette position correspond au centrage de la pupille sur l'axe du cône de convergence des rayons lumineux.

Elle permet également une meilleure répartition de l'éclairage sur la rétine (zone éclairée plus étendue). Il faut noter enfin que cette position garantit la conservation des possibilités de lecture et de travail, la fovéa étant quasiment préservée de tout éclairage.

*« Nous attirons également l'attention sur une propriété remarquable du dispositif, ajoutent les concepteurs. Quel que soit l'angle d'inclinaison de l'œil, dans la gamme considérée, la concentration du flux se produit sur la même région de la rétine (moitié inférieure). C'est une conséquence de la convergence des rayons et de la position relative de la cornée et du foyer. Concrètement, cela signifie que la source « apparente » de lumière se déplace avec le regard. Si le patient baisse les yeux, c'est la partie inférieure du réseau diffractif qui joue le rôle de déflecteur. Lorsqu'il regarde à l'horizontale, c'est la partie supérieure du composant qui intervient. »*

#### c) Efficacité optique - Efficacité biologique

Cette propriété remarquable du système d'optique diffractive de la Luminette® permet d'obtenir **un coefficient de transfert cornée → rétine élevé.**

Ce même dispositif holographique permet d'envoyer les **rayons sur la moitié inférieure de la rétine sur une surface de 1,2 cm<sup>2</sup>**, zone où se trouvent les cellules **ganglionnaires responsables de la transmission nerveuse.**



	Surface rétine éclairée	Unités photométriques	Unités radiométriques	Unités photoniques
Banc 8000 lux	1,3 cm <sup>2</sup>	16 mlm	42,6 μW	11,7 10 <sup>13</sup> ph/s
Banc en lecture	0,7 cm <sup>2</sup>	8 mlm	21,3 μW	5,9 10 <sup>13</sup> ph/s
Casque « 5000 lux »	0,86 cm <sup>2</sup>	10,7 mlm	28,5 μW	7,8 10 <sup>13</sup> ph/s
Casque en lecture	0,5 cm <sup>2</sup>	5 mlm	13,3 μW	3,64 10 <sup>13</sup> ph/s
Banc à diode (à 50 cm)	?	2,4 mlm	6,4 μW	2 10 <sup>13</sup> ph/s
Luminettes	1,2 cm <sup>2</sup>	10 mlm	30,3 μW	8,3 10 <sup>13</sup> ph/s
Seuil de sécurité pour l'œil à 470 nm	1 cm <sup>2</sup>		30 μW	7,2 10 <sup>13</sup> ph/s

Figure 5 : Valeur des flux rétinien pour les différents appareils, obtenue par mesures de l'éclairement sur la cornée et modélisation du transfert à travers le globe oculaire.

#### d) Résultats obtenus :

La valeur de l'éclairement reçu par la cornée se situe dans une plage allant de **545 - 635 μW/cm<sup>2</sup>** en fonction de l'inclinaison du globe oculaire

Ce résultat tient compte de la distribution spectrale de la lumière (Efficacité spectrale / ce paramètre n'est pas défini? / de la Luminette® = système holographique diffractif + LEDs) où on constate une **dominance des « photons bleus »** -les plus énergétiques et les plus efficaces- avec une longueur d'onde maximale = 468 nm.

*« Pour obtenir le niveau d'éclairement (en lux ou en μW/cm<sup>2</sup>) reçu sur la rétine, nous devons combiner la valeur de l'éclairement reçu sur la cornée de 545 - 635 μW/cm<sup>2</sup> avec la valeur de la surface éclairée de la rétine (de 1,2 cm<sup>2</sup>) et la proportion du flux transmis à travers le globe oculaire, obtenus par modélisation,»*

On obtient ainsi les valeurs suivantes sur la rétine :

Niveau d'éclairement = 72 à 84 **lux (unités photométriques)**  
= 21 à 25,4 **μW/cm<sup>2</sup> (unités énergétiques)**

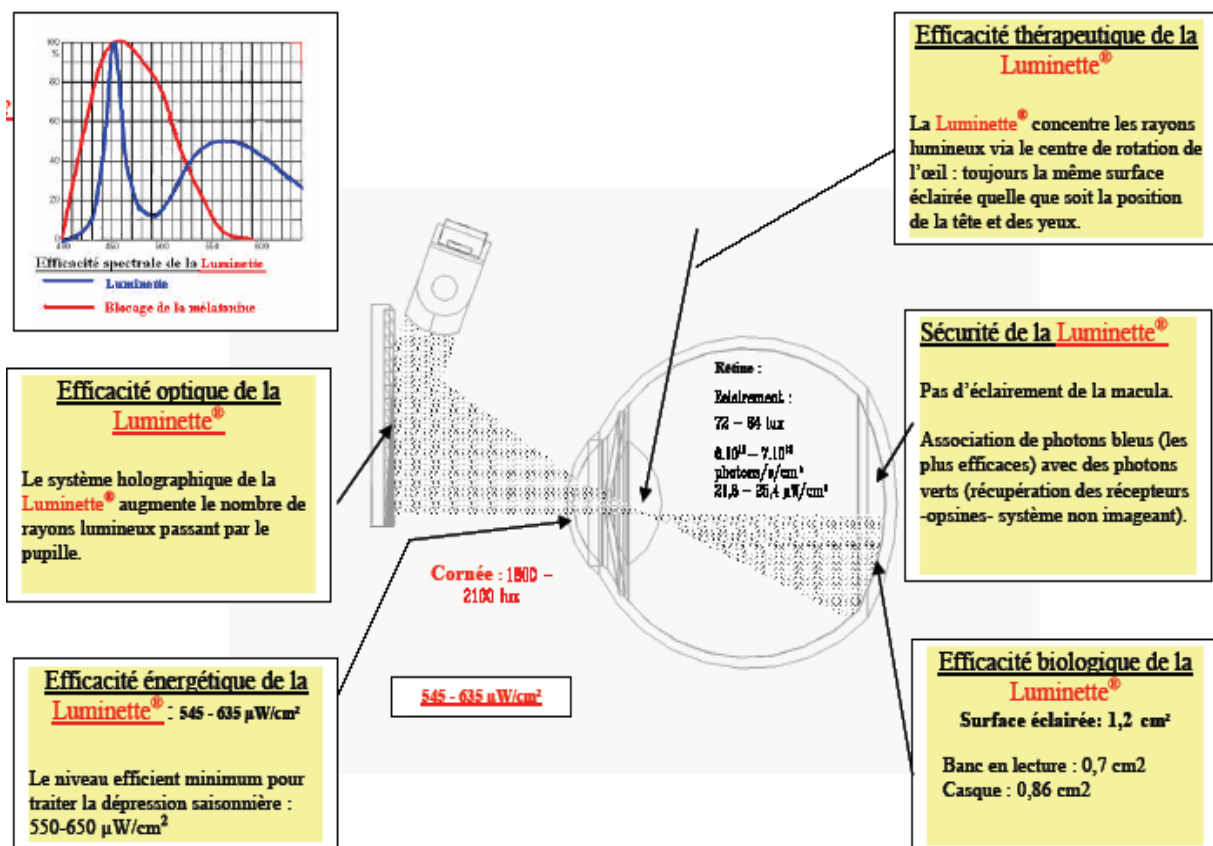


Figure 6 : croquis oeil

le système diffractif présenté ici est différent de celui proposé à la figure 1 (schéma de principe): c'est celui qui a été utilisé pour des raisons pratiques, le raisonnement reste tout-à-fait applicable

## 2) Mesures et validation sur banc d'essai.

Afin de pouvoir quantifier le niveau d'éclairement en lux qui arrive sur la cornée, nous avons construit un banc d'essai sur lequel on place la Luminette®.

Ce banc d'essai est constitué :

- d'un support (représentant la tête) sur lequel vient se placer la Luminette®
- d'un appareil de mesure (luxmètre étalonné) qui joue le rôle de la cornée

Le Banc d'essai de mesure a été dimensionné de telle façon que les positions relatives entre la Luminette® et l'appareil de mesure (luxmètre) représentent le positionnement moyen d'une Luminette® par rapport à l'œil et l'emplacement de la cornée.

Les mesures sont effectuées pour l'œil gauche et l'œil droit

Le résultat moyen des différentes mesures effectuées sur la cornée sont présentés en figure 7.

Eclairement sur la cornée	Equivalent énergétique
2000 lux	545 - 635 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Figure 7 : Mesures effectuées sur la cornée

## Conclusions :

Equipée d'une batterie (AAA) rechargeable logée dans une des branches, " la Luminette® " permet une grande liberté de mouvement et même le port de lunettes correctrices.

La « Luminette » assure des intensités d'éclairage de 2000 lux. Ces luminettes permettent des traitements au domicile des patients. On prescrit également ce type d'appareil dans certaines dépressions. On estime que dans notre pays, 5% de la population souffrent de troubles affectifs saisonniers qui répondent bien à ces traitements. 15% présentent de façon épisodique ou chronique des troubles du sommeil liés à des perturbations des rythmes circadiens.

Dossier réalisé par Ir Emil GALETIC (Lucimed s.a.), Dr Robert POIRRIER du CHU de Liège, Dr Yvon RENOTTE ( HOLOLAB –ULg), le Dr-Ir Vincent MOREAU (DEIOS s.a.) et coordonné par Philippe CRETEUR.