

Lumière artificielle : développement durable et qualité de vie

par Georges ZISSIS

La production de lumière est aujourd'hui si indissociable de notre mode de vie que nous avons bien du mal à imaginer autre chose. Pourtant, le système d'éclairage futur issu du développement durable devra contribuer à notre qualité de vie tout en respectant les ressources énergétiques et environnementales.

Georges ZISSIS est professeur des universités. Il est chercheur au centre de physique des plasmas et de leurs applications (CPAT, UMR CNRS 5002) de l'université Paul-Sabatier (Toulouse-III).
georges.zissis@cpat.ups-tlse.fr

1. La lumière ne fait pas qu'éclairer

L'Homme a toujours voulu continuer à vivre normalement après la tombée de la nuit et s'est donc efforcé de remplacer les sources de lumière naturelle par des sources artificielles. Pendant les siècles qui ont précédé l'invention de l'électricité, la société humaine a dû se contenter de l'utilisation du feu pour produire de la lumière. Les autres sources « naturelles » de la lumière, comme les lucioles ou la foudre par exemple, sont soit très aléatoires, soit très difficiles à maîtriser. Cependant, pendant cette période, l'Homme a rêvé mettre la foudre dans un bocal pour s'éclairer.

Ce rêve fut enfin réalisé voici deux siècles avec l'aide de l'électricité. En effet, la première lampe électrique à arc fut inventée en 1812 par Sir H. Davy et M. Faraday en essayant de reproduire au laboratoire l'expérience de Franklin qui avait démontré la nature électrique de la foudre. La figure 1a montre une représentation de l'œuf de Davy qui fut la première lampe électrique. Les lampes à arc ont dominé le marché de l'éclairage jusqu'à l'invention de la lampe à incandescence par Thomas Edison en 1878 (figure 1b). Très rapidement, la lampe d'Edison a remplacé les lampes à arc et ceci malgré son efficacité plus que médiocre. Cette réussite se justifie partiellement par trois facteurs :

- la lampe à incandescence est plus simple à fabriquer en série ;
- elle avait une durée de vie nettement supérieure à celle des lampes à arc existantes ;

— elle nécessitait très peu d'entretien (les électrodes des lampes à arc devaient être remplacées très fréquemment).

Cependant, le facteur déterminant pour que cette invention domine le marché est un signe précurseur du développement durable : Edison a très vite réalisé que pour imposer son produit, il devait le « démocratiser ». Pour arriver à ce résultat, il a fallu apporter l'électricité chez les particuliers. Edison a donc créé la première société de production et de distribution d'électricité. Il s'agit ici d'un des premiers exemples d'une vision « systémique » de l'Histoire. La société d'Edison existe encore aujourd'hui et elle est connue sous le nom du géant General Electric.

Aujourd'hui, chaque jour, plus de 30 milliards de lampes électriques (à incandescence et à arc confondues) fonctionnent sur Terre. Il s'agit de la seule invention de notre espèce visible de l'espace (figure 2). L'éclairage mis à part, ces lampes assument aujourd'hui d'autres fonctions :

- par le jeu des lumières et des couleurs, elles décorent et embellissent notre environnement (domestique et urbain) ; elles mettent en valeur nos monuments et nos villes ;
- par la qualité et la quantité de la lumière, elles facilitent l'accomplissement de nos tâches quotidiennes en augmentant nos performances visuelles ; elles facilitent les échanges entre les personnes en créant des ambiances propices à cela ; elles contribuent à la sécurité urbaine et routière ;
- par la modulation de la quantité et de la qualité de la lumière, elles contribuent à notre santé mentale et physique.

En ajoutant à cela que les 30 milliards de lampes consomment aujourd'hui plus de 15 % de l'électricité mondiale (plus de 2 100 TWh par an) correspondant à 1 700 millions des tonnes de gaz carbonique injecté dans l'atmosphère [IN 26], on réalise que les sources de lumière sont inextricablement liées à la qualité de la vie, l'aménagement du territoire,

Du même auteur :

Diodes électroluminescentes pour l'éclairage [IN 18] de G. Zissis

Sources de lumière du XXI^e siècle [IN 26] de G. Zissis et J.-J. Damelinourt



Figure 1 – Premières lampes électriques

l'énergie et l'environnement. Elles sont aussi intimement liées au développement durable de notre société.

2. Sources de lumière et développement durable

Pour mieux comprendre l'importance des sources de lumière artificielle pour le développement durable, il faut commencer par la définition de ce dernier. D'après l'*Encyclopedia Universalis* (v. 10.0), l'expression « développement durable » désigne « un développement qui permet de répondre aux besoins présents sans compromettre la capacité des générations futures à faire face aux leurs ». En ce qui concerne la production de la lumière, ces lignes peuvent prendre un sens différent pour les pays occidentaux et pour les pays en voie de développement.

La consommation énergétique d'un pays occidental pour l'éclairage varie entre 5 % et 15 % de sa propre production énergétique (avec un cas singulier, les États-Unis, où ce pourcentage atteint 19 à 20 %) [d'après l'International Association for energy-efficient lighting (IAEEL)]. Sachant qu'approximativement 60 % de cette quantité d'énergie est utilisée

pour l'éclairage de bâtiments à destination industrielle et tertiaire, il est possible de contenir la croissance de la demande en utilisant des moyens légaux (normes et directives) qui imposent *de facto* l'utilisation de sources de lumière énergétiquement efficaces (proposition de directive COM/2001/0226 final). L'éclairage du secteur résidentiel, quant à lui, représente 30 % de la note globale d'énergie et il est bien plus difficile à réglementer. La solution consisterait à user des moyens plutôt incitatifs et surtout à informer la population des avantages de certaines technologies économes en énergie. En Europe, par exemple, si, dans nos maisons, nous remplaçons une lampe à incandescence de 75 W par une lampe fluo-compacte (lampe « basse consommation ») de 15 W qui produit la même quantité de lumière, nous réaliserions des économies considérables. Chaque foyer économiserait en moyen 150 kWh par an et compte tenu que l'Europe compte environ 150 millions des foyers, les économies annuelles s'élèveraient à plus de 22 TWh ou l'équivalent de 4 millions de tonnes de pétrole (TEP).

Il faut aussi insister grandement sur le fait qu'« éclairer » ne signifie pas « inonder » un objet ou un espace de lumière ! Cependant, aujourd'hui, dans les pays riches, nous aurions plutôt tendance à augmenter la quantité de la lumière sous prétexte que la performance visuelle s'accroît. On sait pourtant que la majorité des êtres humains se dit satisfaite du niveau d'éclairement à partir de 400 à 500 lux, sans pouvoir être capable de distinguer une amélioration des conditions de travail ou de la qualité de vie au-delà de ces valeurs...

En ce qui concerne les pays en voie de développement, la situation est différente. L'éclairage représente aujourd'hui la majeure partie de leur consommation électrique : 30 % pour la Tunisie, presque 40 % pour Madagascar et jusqu'à 86 % pour la Tanzanie (d'après l'IAEEL). L'éclairage domestique est ici prédominant. Cette situation s'explique facilement car la lumière est un besoin intime de l'Homme, et, bien entendu, dès que l'électrification avance, la population en profite en installant tout d'abord des lampes. Par ailleurs, dans ces pays, le coût de la lampe est un facteur majeur pour le choix du type de la source de lumière. Ainsi, les lampes à incandescence dominent le marché car les lampes basse consommation sont souvent inabordables. Comme il s'agit d'un usage principalement domestique, il est difficile d'imposer un type de lampe par décret. Par ailleurs, il est difficile pour l'économie de ces pays de supporter à long terme des mesures incitatives consécutives. L'équation semble difficile à résoudre, pourtant il existe une solution. Il faut développer des produits basés sur des technologies actuelles (lampes fluo-compactes) plus « rustiques » mais bien plus robustes et surtout moins chères. La robustesse du produit est ici primordiale car la qualité du réseau électrique peut être plus aléatoire que dans des pays occidentaux et les lampes à décharge supportent moins bien les fluctuations de la tension. Par ailleurs, la robustesse garantie une faible fréquence de maintenance. Toutefois, ces produits adaptés et moins chers doivent obéir aux mêmes exigences énergétiques et environnementales que les produits destinés aux marchés occidentaux. Par exemple, la directive européenne 2002/95/CE (applicable à partir

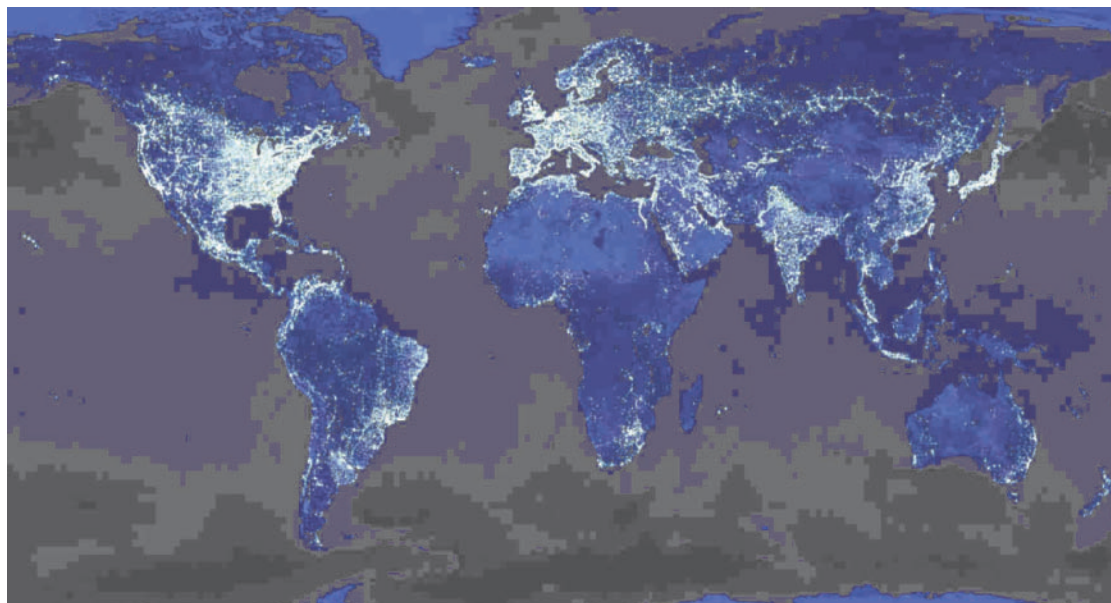


Figure 2 – Aujourd'hui la lumière artificielle est visible depuis l'espace (doc. NASA Visible Earth)

de 2006) concernant la régulation des produits concernant des matières toxiques impose que la quantité de mercure dans une lampe fluo-compacte reste strictement inférieure à 8 mg (directives 2002/95/CE, 2002/96/CE et 2003/108/CE) ; il existe malheureusement aujourd'hui beaucoup de lampes fluo-compactes « bas coût » qui ne satisfont pas cette contrainte. Évidemment, le développement d'un tel produit nécessite un investissement initial qui ne peut être supporté par les pays riches ou les groupes industriels du secteur. Toutefois, le retour sur investissement est rapide et profitable pour tous. Il faut enfin doter ces pays de moyens de qualification de produits qui pénètrent leur marché afin d'éviter des supercheres.

Certains prônent aujourd'hui qu'une solution pour ces pays serait l'utilisation extensive des sources d'énergie renouvelable (surtout le Soleil) pour alimenter des lampes économes (fluorocompactes, LED...). La solution semble attractive, mais elle ne résiste pas à une analyse critique. L'utilisation de l'énergie solaire (disponible par définition aux heures où l'éclairage artificiel n'est pas indispensable) nécessite des unités de stockage de l'énergie. Ces unités sont aujourd'hui coûteuses et volumineuses, elles ont une durée de vie courte et elles nécessitent un entretien régulier par des spécialistes. Enfin, elles contiennent beaucoup des matières nocives pour l'environnement au point de nécessiter un recyclage en fin de vie. Bref, elles sont incompatibles avec la définition même du développement durable pour les pays en voie de développement.

Quelques cas particuliers existent : les pays producteurs de pétrole en sont un. Dans un pays comme le Koweït où l'énergie est subventionnée à hauteur de 80 % par l'État, le coût du kilowatt-heure est si faible pour la population que l'achat d'une lampe économique ne se justifie pas [1]. Une question se pose :

comment faire des économies d'énergie dans ce cas ? Une solution étudiée par le gouvernement consiste à acheter un grand nombre des lampes fluo-compactes et à les distribuer gratuitement à la population. Un calcul de retour sur investissement basé sur le remplacement de la moitié de lampes d'un foyer, montre que l'investissement initial est amorti en 9 à 10 mois. Toutefois, une étude a montré que 15 % de la population refuserait d'utiliser ces lampes car elles sont considérées comme « difformes ». Cela montre que la population ne connaît pas les nouvelles générations du produit qui ressemblent de près à certaines lampes à incandescence. Ici, le développement durable passerait par une campagne d'information et d'éducation de la population.

Il existe enfin en 2004 sur la Terre plus de 1,7 milliard de personnes que n'ont pas accès à l'éclairage électrique (ils étaient 2 milliards en 1996, selon la Banque mondiale) [2].

Cette fraction de la population continue à utiliser des lampes à pétrole pour s'éclairer. Il se trouve que pour ces mêmes populations, le prix du pétrole pour l'éclairage est un fardeau. Pour la même quantité de lumière produite, les dépenses liées à l'éclairage par ce biais sont 325 fois plus importantes que celles qui sont engendrées par une lampe à incandescence ou même 1 625 fois supérieures en les comparant à une lampe fluo-compacte. La dépense annuelle moyenne de ces populations pour l'éclairage avec du pétrole est de l'ordre de 100 € par foyer pour produire l'équivalent de 12 000 lm · h. Pour une maison électrifiée, la même quantité de lumière est produite par une lampe à incandescence de 100 W en 10 h. Globalement, pour une dépense équivalente, ces populations disposent seulement de 1 % de la quantité de lumière d'un pays électrifié... Donner accès à l'éclairage électrique à ces populations est un facteur de développement durable. Cela ne signifie pas

LED : *light emitting diode*, diode électroluminescente

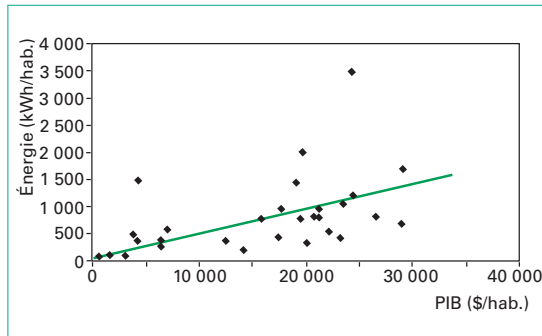


Figure 3 – Relation entre le produit intérieur brut et l'énergie annuelle consommée pour l'éclairage (d'après [3])

nécessairement qu'il faille connecter tout point du globe au réseau électrique. La fondation Light-Up The World procure, pour un prix modique (1 \$), à des populations déshéritées de petites lampes frontales utilisant des LED blanches d'une puissance globale de 1 W connectées à une pile. Cet éclairage d'appoint permet aux personnes de prolonger leurs activités d'artisanat dans la soirée et d'augmenter ainsi le revenu familial, mais elle permet surtout aux enfants d'étudier et de suivre ainsi une scolarité normale.

Nous savons aujourd'hui que la population mondiale croît à un rythme soutenu et que, malgré tout, le niveau de vie de la population progresse lentement. Par ailleurs, comme Mills [3] l'a montré dans ses travaux, il existe une relation quasi linéaire (figure 3) entre le produit intérieur brut et la consommation énergétique pour l'éclairage par habitant. Compte tenu de ces deux constatations, nous avons aujourd'hui la certitude que les besoins en éclairage

de l'humanité ne feront que croître ; on pourrait s'attendre à un facteur de l'ordre de 2 pour les deux décennies à venir. Comment satisfaire cette croissance sans que la demande énergétique du secteur progresse dans la même proportion ? Il s'agit ici d'une question qui relève entièrement du développement durable. La figure 4 illustre de façon très synoptique des moyens que nous devons mettre en œuvre pour répondre à cette question. Le système d'éclairage futur issu de ce processus doit bien sûr satisfaire les besoins en lumière, mais il doit respecter les ressources énergétiques et environnementales, il doit contribuer à la qualité de vie et enfin il doit être au service de l'utilisateur.

3. Lumière, qualité de vie et performance visuelle

Nous vivons dans un monde où la lumière naturelle est abondante pendant le jour et parfois même suffisante pendant la nuit (Lune, ciel étoilé). Notre système visuel s'est très bien adapté à ces situations extrêmes. Ainsi, notre œil peut être impressionné par une luminance de l'ordre de 10^{-5} cd/m² (ciel étoilé sans Lune) à quelque 10^4 cd/m² (journée d'été avec le Soleil au zénith). La performance d'accomplissement d'une tâche précise dépend fortement de la quantité de la lumière : nous ne pouvons lire sous un ciel étoilé, mais nous pouvons éviter les obstacles sur notre chemin...

Nous vivons surtout dans un monde où la lumière varie de façon régulière avec l'heure dans la journée, les saisons et la position géographique. Cette variation de la lumière influence notre cycle circadien, c'est-à-dire qu'elle règle les phases d'éveil et de somnolence et notre comportement saisonnier (ce dernier est beaucoup plus marqué pour d'autres espèces animales et végétales).

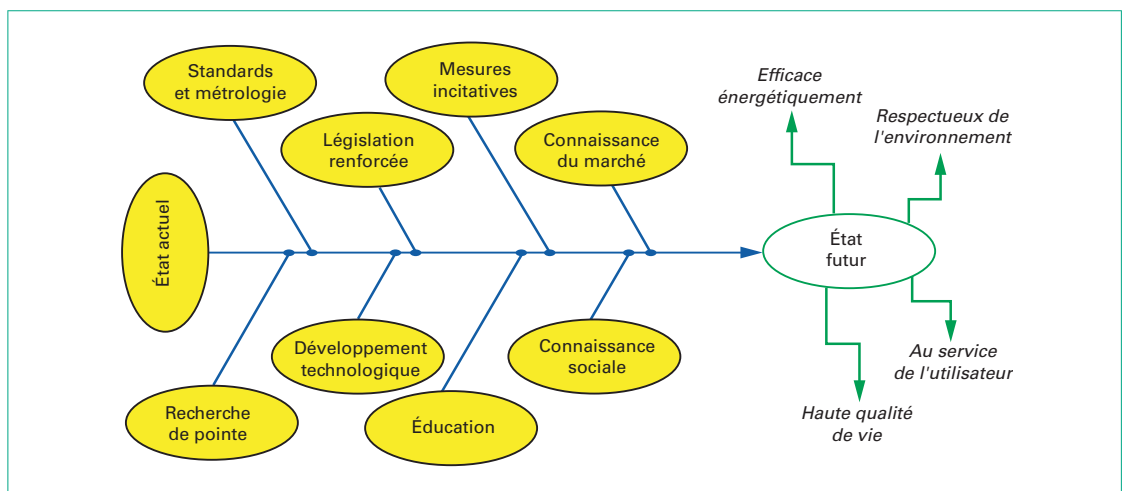
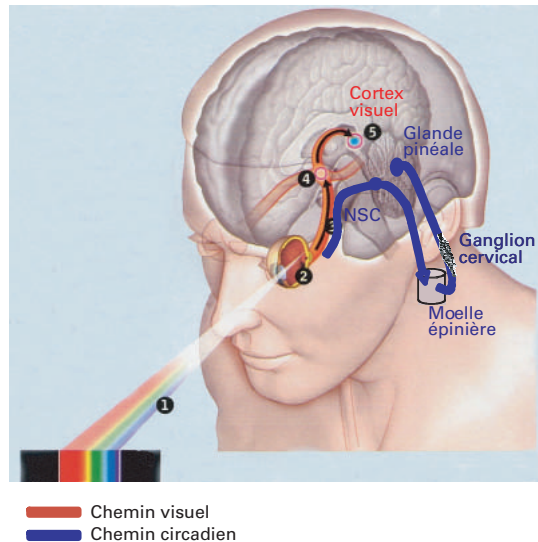


Figure 4 – Comment satisfaire les besoins futurs en éclairage sans compromettre les ressources énergétiques et environnementales



L'horloge biologique centrale est localisée dans le noyau suprachiasmatique (NSC) qui se trouve dans la partie antérieure de l'hypothalamus. Le NSC produit plusieurs neuropeptides de manière circadienne et envoie des signaux oscillants à la glande pinéale.

Figure 5 – Chemins « visuel » et « circadien » de l'excitation lumineuse dans le cerveau humain

3.1 Lumière et cycles biologiques

Nous savons aujourd'hui que la lumière qui arrive à notre œil influence des récepteurs de deux types, les uns sont liés au « chemin visuel », les autres au « chemin circadien » (figure 5). Ces deux chemins sont indépendants et leurs rôles sont bien différenciés. L'excitation visuelle est responsable pour la vision tandis que l'excitation du chemin circadien influence la sécrétion de certaines hormones (mélatonine et cortisol). Comme le montre la figure 6, la concentration de ces deux hormones dans le corps humain est directement liée aux cycles biologiques quotidiens (température corporelle et état de vigilance). Aujourd'hui, nous savons que la variation quotidienne de la lumière joue plutôt un rôle de synchronisation de nos rythmes « internes » aux cycles quotidiens et saisonniers. En effet, placé dans un environnement constant, en isolement temporel, un humain conserve un rythme d'alternance d'activité et de sommeil (l'activité peut être assimilée à l'état de vigilance). La persistance de la rythmicité montre qu'elle est d'origine endogène, avec une période propre qui est proche mais différente de 24 heures. Pendant les deux premières semaines d'isolement, la période du rythme éveil-sommeil est de l'ordre de 25,7 h tandis qu'elle approche 24 h après cette période. Il faut noter que pendant ce temps, le rythme de la variation de la température corporelle reste quant à lui presque inchangé (25,1 h après deux semaines d'isolement) [4].

Par ailleurs, la figure 7 montre que le « taux d'erreur » pour l'exécution d'une tâche est lié à l'état

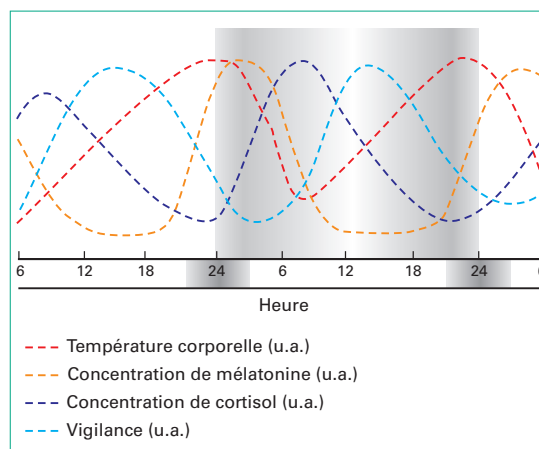


Figure 6 – Corrélation entre les concentrations de mélatonine et de cortisol et la température corporelle et l'état de vigilance de l'être humain

de vigilance et à la variation quotidienne de la lumière. La baisse des performances exprime clairement la « fatigue » liée à nos cycles biologiques synchronisés par la variation quotidienne de la lumière naturelle. Il faut souligner que l'expression « variation de lumière naturelle » concerne aussi bien la quantité (en moyenne, quelques milliers de lux le matin et au crépuscule à quelques dizaines de milliers de lux au milieu de la journée) et la qualité de

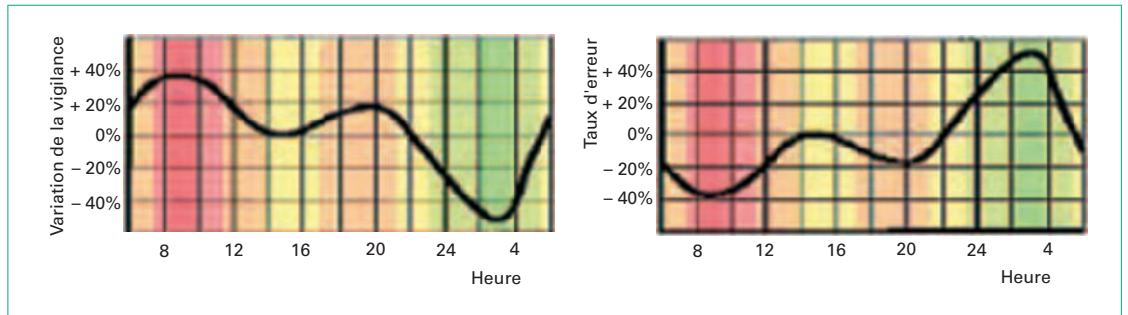


Figure 7 – Comparaison du taux d'erreur pour l'exécution d'une tâche avec la variation de l'état de vigilance qui suit la variation quotidienne de la lumière naturelle

lumière (des teintes « chaudes » au lever et au coucher du Soleil aux teintes « froides » pendant la journée). Des systèmes d'éclairage artificiel qui peuvent imiter ces variations contribuent indiscutablement à l'amélioration de la qualité de vie de leur utilisateur. Ainsi, en première approche, une lumière « froide », uniforme et abondante contribue à la suppression de la mélatonine et nous pousse vers un état de vigilance accrue, elle serait donc idéale pour stimuler le travail et pour augmenter la performance. Par opposition, une lumière « chaude », non uniforme et tamisée contribue à l'augmentation de la concentration de mélatonine et prépare l'organisme à une phase de sommeil et de détente. Elle serait donc idéale pour l'éclairage résidentiel. Ces principes sont souvent appliqués plus ou moins intuitivement par les concepteurs d'éclairage. La question qui se pose aujourd'hui est plutôt d'ordre quantitatif : peut-on caractériser l'efficacité circadienne d'une source de lumière artificielle comme nous le faisons pour son efficacité lumineuse ?

La découverte en 2002 par David Berson et coll. [5] d'une nouvelle cellule photoréceptrice dans l'œil a permis de mieux comprendre les effets biologiques de la lumière sur les êtres humains. La sensibilité spectrale de ce nouveau type de cellule a entre-temps fait l'objet d'études et montre que la lumière tirant vers le bleu a un effet stimulant plus important sur le plan biologique que la lumière tirant vers le rouge. La sensibilité de ce photorécepteur varie naturellement aussi pour les différentes longueurs d'onde de lumière. En se basant sur le facteur biologique de suppression de mélatonine, Brainard [6] a été en mesure de déterminer la courbe spectrale de l'action biologique. Cette courbe est représentée sur la figure 8, avec la courbe visuelle de sensibilité des cônes. En comparant les deux courbes, il ressort immédiatement que la sensibilité biologique pour les diverses longueurs d'onde de lumière diffère fortement de la sensibilité visuelle. Si la sensibilité visuelle maximale se trouve dans la région de longueur d'onde jaune-vert, la sensibilité biologique maximale se trouve quant à elle dans la région bleue du spectre. Ces phénomènes ont une signification importante dans le cadre des spécifications d'un éclairage tenant compte de la santé. Pour quantifier

l'action biologique de lumière, nous avons défini le « facteur circadien » α_{cv} de la lumière comme suit :

$$\alpha_{cv} = \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} F(\lambda) c(\lambda) d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} F(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

où $F(\lambda)$ est le flux spectrique de la source, $V(\lambda)$ la réponse normalisée de l'œil humain aux stimuli visuels (conditions photopiques) et $c(\lambda)$ la fonction de pondération « circadienne ».

En général, on peut écrire que :

$$\Phi_{\text{circadien}}(\lambda) = \alpha_{cv} \Phi_{\text{visuel}}(\lambda) \quad (2)$$

où $\Phi_{\text{circadien}}(\lambda)$ et $\Phi_{\text{visuel}}(\lambda)$ sont les flux « circadien » et lumineux de la source.

Ce facteur circadien donne une idée de la **qualité biologique de la lumière**.

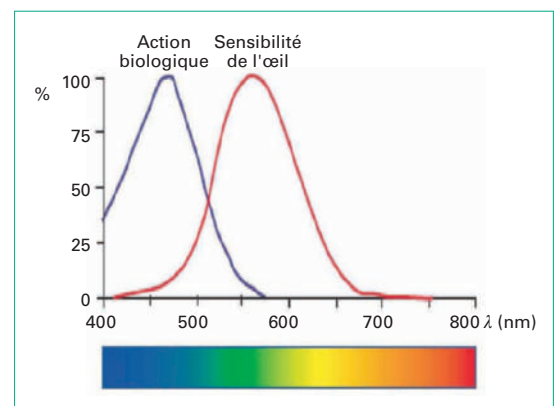


Figure 8 – Courbe spectrale normalisée de l'action biologique (basée sur la suppression de la mélatonine) et courbe visuelle de sensibilité de l'œil

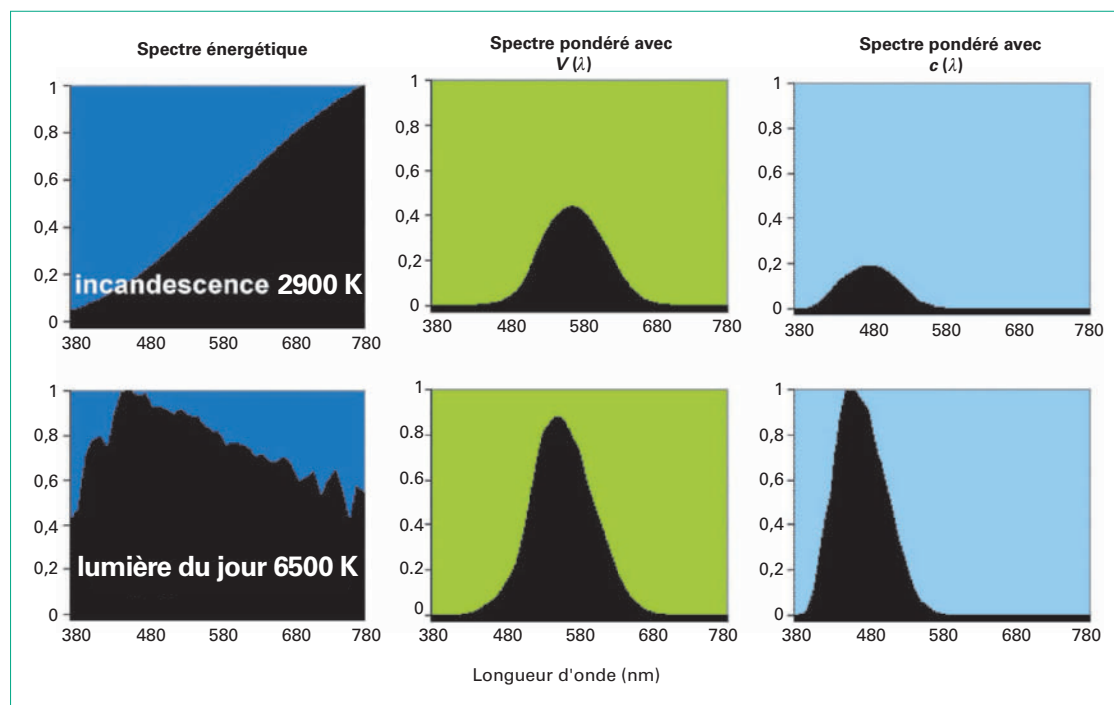


Figure 9 – Spectres pondérés des deux lampes communément utilisées : ampoule à incandescence (température de couleur de 2 900 K) et tube fluorescent dit « lumière du jour » (température de couleur de 6 500 K)

Si $\alpha_{cv} = 1$, la source de lumière émet un rayonnement équilibré en ce qui concerne son action visuelle et biologique. Notons que α_{cv} peut prendre des valeurs supérieures à 1.

La figure 9 montre les spectres pondérés de deux lampes communément utilisées (ampoule à incandescence et tube fluorescent). En appliquant la relation (1), on trouve $\alpha_{cv} = 0,4$ pour la lampe à incandescence et $\alpha_{cv} = 1$ pour le tube fluorescent dit « lumière du jour ». La lampe fluorescente est-elle donc la source idéale pour assurer le bien-être de notre espèce ? La réponse n'est pas simple.

3.2 Lumière et ambiance

Le résultat précédent montre tout simplement que le tube fluorescent a une émission équilibrée tandis que la lampe à incandescence utilise seulement 40 % de son flux lumineux pour l'excitation du chemin circadien et la suppression de mélatonine. Assurément, le tube fluorescent à 6 500 K est bien plus efficace pour la suppression de mélatonine dans notre corps que la lampe à incandescence à 2 900 K. Il contribue ainsi à l'amélioration de la performance au travail, mais il est complètement contre-indiqué pour un espace de détente.

Il existe une relation remarquable entre le facteur circadien et la température de couleur de la lampe (figure 10). Par ailleurs, les travaux de Kruithoff ont montré que pour créer une ambiance acceptable pour l'être humain, la température de couleur ne peut pas être dissociée de l'éclairement (figure 11).

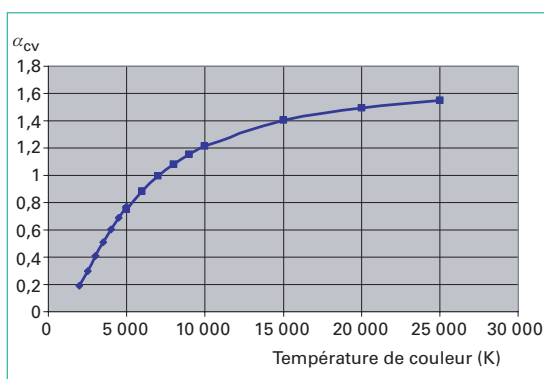


Figure 10 – Évolution du facteur circadien d'une source de lumière en fonction de sa température de couleur

Ce diagramme permet de trouver le bon couple température de couleur – éclairement pour créer une ambiance confortable. Il montre clairement que si pour une température de couleur basse un éclairage très fort est choisi, l'ambiance devient « trop chaude » pour être supportable, tandis qu'un éclairage faible avec une température de couleur élevée produira une ambiance crépusculaire à la limite de la réalité et par conséquent désagréable.

Enfin, dans cette réflexion concernant l'ambiance, il faut intégrer l'indice de rendu de couleur (IRC) de

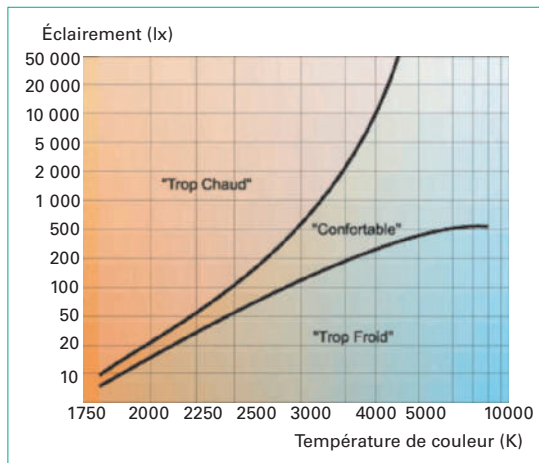


Figure 11 – Diagramme de Kruithoff

la source. Comme le montre la figure 12, l'apparence colorée d'un objet éclairé par une source de lumière (exprimée par l'indice de rendu de couleur de la source) dépend fortement du spectre d'émission de la lampe. Il est évident que pour créer une ambiance confortable, la source de lumière doit avoir un bon indice de rendu de couleur.

3.3 Lumière et performance visuelle

Pendant plusieurs décennies, la plupart des spécialistes de l'éclairage ont limité leurs travaux sur la

performante visuelle à l'influence seule de la quantité et de la distribution de lumière nécessaire pour accomplir une tâche donnée. Ces travaux ont montré qu'en fonction de la difficulté de la tâche, il existe une relation directe entre la performance et la quantité de lumière. La figure 13 montre qu'en augmentant l'éclairement sur le plan de travail, la productivité augmente et que la fatigue des travailleurs diminue. Cependant, il ne faut pas extrapoler ces courbes. Au-delà d'une certaine limite (située entre 500 et 1 000 lx), la majorité des personnes se déclare satisfaite de la quantité de lumière. Aujourd'hui, les normes européennes (voir Normalisation ci-après) fixent l'éclairement minimum pour une tâche simple à 300 lx et pour une tâche difficile à 1 000 lx (des valeurs supérieures peuvent être imposées par la législation de certains pays). Par ailleurs, la quantité de lumière nécessaire pour accomplir une même tâche avec une même performance augmente rapidement avec l'âge (figure 14a).

L'uniformité de l'éclairement sur le plan et la position des sources de lumière ont également été étudiées afin d'éviter la création des zones d'ombre et l'éblouissement. Nous savons aujourd'hui que l'éblouissement est une source importante d'inconfort et il doit être éliminé dans la mesure du possible. Notons que les êtres humains deviennent de plus en plus sensibles à l'éblouissement avec l'âge (figure 14b). Une solution pour éviter l'éblouissement consisterait à utiliser un éclairage indirect, mais cette solution a ses limites car ce type d'éclairage peut générer une sensation désagréable s'il est mal utilisé (figure 15).

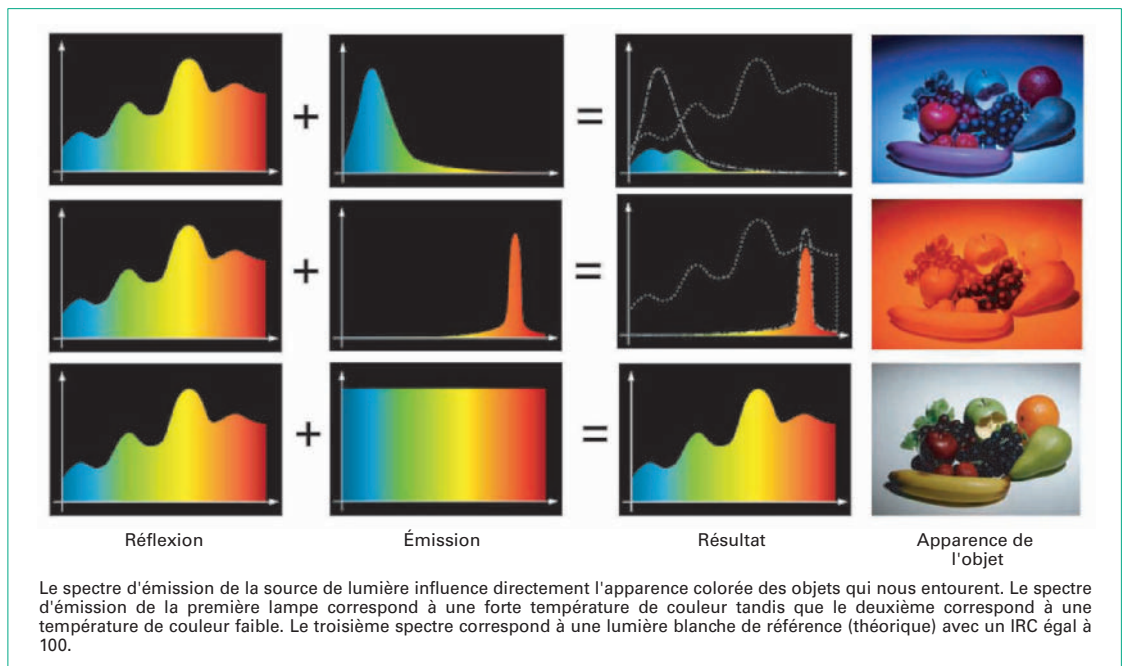


Figure 12 – Influence de l'indice de rendu de couleur

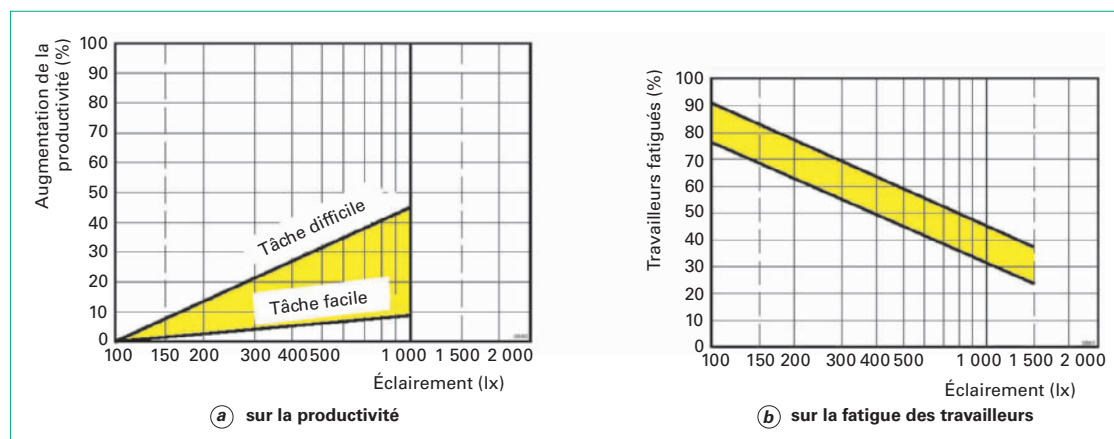


Figure 13 – Influence du niveau d'éclairage

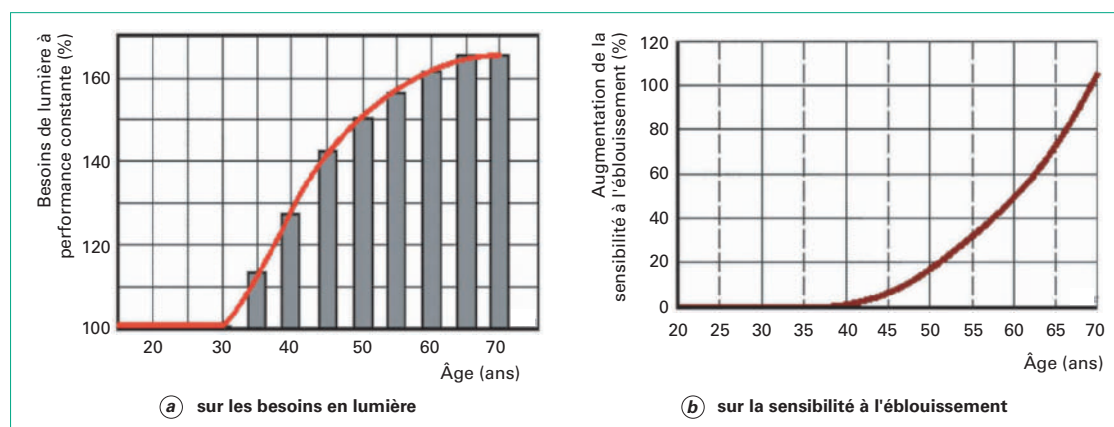


Figure 14 – Influence de l'âge

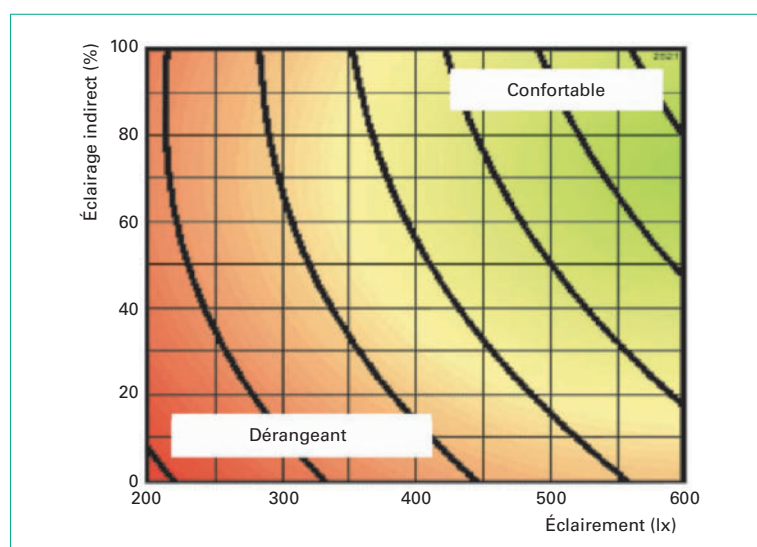


Figure 15 – Éclairage indirect

4. En guise de conclusion

La production de la lumière artificielle est un besoin absolu pour notre société. Plus le niveau de vie augmente, plus la société devient demandeuse de lumière artificielle. La production de la lumière nécessite par ailleurs une quantité d'énergie considérable (plus de 12 % de l'électricité mondiale). En outre, la lumière contribue inexorablement à la qualité de notre vie en passant par la synchronisation de notre horloge biologique ou plus simplement par la création d'une ambiance agréable qui facilite les échanges entre personnes. Jusqu'à aujourd'hui, ces deux aspects de la production de lumière étaient abordés séparément et le résultat obtenu n'était pas celui escompté... On peut donc se poser légitimement la question : pour quand un label énergie qui prenne en compte la qualité de vie ?

Réglementation

Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil sur la performance énergétique des bâtiments [COM(2001) 226 final – 2001/0098(COD)]

Directive 2002/95/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques

Directive 2002/96/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)

Directive 2003/108/CE du Parlement européen et du Conseil du 8 décembre 2003 modifiant la directive 2002/96/CE relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)

Waste electrical and electronic equipment

http://europa.eu.int/comm/environment/waste/weee_index.htm

Bibliographie

Références

- [1] AL-RAGOM (F.). – *Socio-Economic Factors Influencing Domestic Utilization of Compact Florescent Lamps in Kuwait*. Proc. of the 6th Int. Conf. on Energy-Efficient Lighting, 9-11 mai 2006, Shanghai (Chine), 157-159.
- [2] JONES (R.) et GENTRY (Z.M.). – *Alternatives to Fuel-Based Lighting in Rural China*. Proc. of the 6th Int. Conf. on Energy-Efficient Lighting, 9-11 mai 2006, Shanghai (Chine), 397-400.
- [3] MILLS (E.). – *Why we're here : The \$ 230-billion global lighting energybill*. Conférence Right Light 5, Nice, p. 369 (2003).
- [4] WEVER (R.A.). – *The Circadian System of Man Results of Experiments under Temporal Isolation*. Springer-Verlag, Heidelberg (1979).
- [5] BERSON (D.M.), DUNN (F.A.) et TAKAO (M.). – *Photo-transduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock*. Science, 295, 1070 (2002).
- [6] BRAINARD (G.), HANIFIN (J.), GRESSON (J.) et coll. – *Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans : Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor*. Neurosci., 16, 6405-6412 (2001).

Dans les Techniques de l'Ingénieur

ZISSIS (G.). – *Diodes électroluminescentes pour l'éclairage*. [IN 18], Électronique (2004).

ZISSIS (G.) et DAMELIN COURT (J.-J.). – *Sources de lumière du XXI^e siècle*. [IN 26], Bâtiments et travaux neufs (2004).

Normalisation

A titre d'exemples, citons :

| | | |
|------------------|-------|--|
| NF EN 12193 | 10-99 | Lumière et éclairage – Éclairage des installations sportives |
| NF EN 12464-1 | 6-03 | Lumière et éclairage – Éclairage des lieux de travail – Partie 1 : lieux de travail intérieur |
| PR NF EN 12464-2 | 5-03 | Lumière et éclairage – Éclairage des lieux de travail – Partie 1 : lieux de travail extérieurs |
| NF EN 12665 | 11-02 | Lumière et éclairage – Termes de base et critères pour la spécification des exigences en éclairage |
| NF EN 13032-1 | 10-04 | Lumière et éclairage – Mesure et présentation des données photométriques des lampes et des luminaires – Partie 1 : mesurage et format de données |
| NF EN 13032-2 | 4-05 | Lumière et éclairage – Mesure et présentation des données photométriques des lampes et des luminaires – Partie 2 : présentation des données utilisées dans les lieux de travail intérieurs et extérieurs |

Organismes

Light Up The World Foundation (LUTW)

<http://www.lightuptheworld.org>

International Association for energy-efficient lighting (IAEEL)

<http://www.iaeel.org>