Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**

# HIGH PERFORMANCE INTEGRATED LIGHTING SYSTEMS (GREENLIGHTING)

# DISPOSITIFS D'ECLAIRAGE INTEGRES A HAUTE PERFORMANCE ENERGETIQUE

## Rapport annuel 2007



| | |
|---|---|
| Auteur(s) | Prof. Dr J-L Scartezzini, F. Linhart, A. Gabrani |
| Institution mandatée | Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment |
| Adresse | EPFL, Bâtiment LE, CH-1015 Lausanne |
| Téléphone, E-mail, site Internet | 021 / 693 4545, leso@epfl.ch, http://leso.epfl.ch |
| N° contrat OFEN | 151 609 |
| Durée prévue du projet (de - à) | 1er janvier 2006 – 30 juin 2009 |



**RÉSUMÉ**

L'éclairage électrique est responsable d'une part importante de la consommation d'électricité des bâtiments, plus particulièrement dans les secteurs administratifs et tertiaires. L'intégration optimale de dispositifs d'éclairage naturel et artificiel, basée sur **l'utilisation de sources lumineuses et de composants optique à haut rendement**, permet d'envisager des stratégies d'éclairage plus performantes sur le plan énergétique. Les progrès technologiques considérables réalisés dans ce domaine, tant en matière de recherche (dispositifs anidoliques d'éclairage naturel, gestion bio-mimétique des installations techniques, etc.) que de développements technologiques (sources lumineuses à haute efficacité, luminaires à haut rendement, etc.), sont autant d'arguments en cette faveur.

Le projet vise ainsi à concevoir et à mettre en œuvre un **dispositif intégré d'éclairage naturel et artificiel** susceptible d'atteindre une consommation spécifique effective d'électricité inférieure à 3 W/m$^2$. Il est envisagé pour cela de faire appel à des lampes à décharge de nouvelle génération (halogénures métalliques, tubes fluorescents à ballasts électroniques), à des luminaires à haut rendement (optique non-imageante, matériaux à haut pouvoir de réflexion), ainsi qu'à des dispositifs avancés de contrôle de l'éclairage artificiel (réseau de neurones artificiels, algorithme génétique). La comparaison des performances lumineuses de ce dispositif avec celles d'une installation conventionnelle d'éclairage électrique, équipant un local de bureau identique, permettra de procéder à **une validation expérimentale « in-situ »** de ce dernier.

L'étude prospective des possibilités offertes en matière d'éclairage intérieur par de nouvelles technologies d'éclairage, telles que les diodes électroluminescentes (LED et/ou OLED) et les luminaires conçus à partie de l'optique non-imageante viendra compléter ce projet. Ces activités constituent la contribution suisse à l'**IEA ECBCS Annex 45 « Energy Efficient Electric Lighting of Buildings ».** Elles s'insèrent plus particulièrement dans le cadre de la SubTask B « Innovative Technical Solutions » de ce programme de recherche, placé sous la responsabilité de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA).

## Buts du projet

Le projet vise à tirer profit des connaissances scientifiques acquises au Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment (LESO-PB) de l'EPFL dans le domaine des dispositifs d'éclairage naturel (SCARTEZZINI and COURRET, 2002). Celles-ci ont fait l'objet d'étroites collaborations avec des partenaires industriels du secteur de la construction (Felix Construction, Flabeg/Pilkinton, Baumann-Hüppe) et de l'éclairage (Philips Lighting, Regent Lighting), matérialisées par une certain nombre de publications référencées (PAGE et al., 2007) (ANDERSEN M. et al., 2001) (SCARTEZZINI et al., 2000).

Il s'agit pour ce faire de réaliser les principales étapes suivantes de ce projet de recherche :

- **concevoir et réaliser un dispositif intégré d'éclairage naturel et artificiel**, approprié à des bâtiments administratifs et tertiaires;
- **optimiser les performances énergétiques et lumineuses de ce dispositif** en faisant appel à de nouvelles sources (lampes à décharge, tubes fluorescents à ballasts électroniques, etc.) et à des réflecteurs à haut rendement (optique non-imageante, revêtement à haut pouvoir de réflexion, etc.);
- **comparer les performances globales de ce dispositif** (économies d'énergie, confort visuel) avec celle d'une installation conventionnelle d'éclairage artificiel équipant un même local de bureau.

L'étude prospective des possibilités offertes en matière d'éclairage intérieur par de nouvelles technologies d'éclairage (diodes électroluminescentes, luminaires basés sur l'optique non-imageante) viendra compléter ce projet (SCARTEZZINI J.-L., 2003). Ces travaux constituent la contribution suisse à l ' l'**IEA ECBCS Annex 45 « Energy Efficient Electric Lighting of Buildings »** et s'insèrent plus particulièrement dans le cadre de la SubTask B « Innovative Technical Solutions » de ce programme de recherche international.

## Travaux effectués et résultats acquis

Les résultats suivants ont été obtenus au cours de l'année écoulée en ce qui concerne les principaux objectifs du projet :

### A. "High Performance Lighting Systems "

Un **cahier des charges du dispositif intégré d'éclairage naturel et artificiel** a été élaboré (cf. Rapport Annuel 2006), en vue de satisfaire les exigences liées aux impératifs d'économies d'énergie et d'ergonomie visuelle. **L'étude préliminaire de différentes sources et luminaires d'éclairage artificiel** a ainsi pu être réalisé sur cette base. Celle-ci a été concentrée principalement sur les lampes à décharge (lampes à arc et tubes fluorescents), qui représentent à ce jour les sources à plus haute efficacité lumineuse, accessibles sur le marché, en y incluant :

- des lampes à halogénures métalliques de 35 et 70 Watts (Philips CDM-R);
- des tubes fluorescents de faible diamètre de 14 et 13 Watts (Osram T8, T5 et T2);
- des lampes fluorescents compactes de 4 et 7 Watts (IKEA Sparsam);
- des lampes à sources électroluminescentes munies d'un culot à vis (LED PAR 30).

L'efficacité lumineuse de ces sources artificielles a été déterminée expérimentalement par l'intermédiaire d'une nouvelle méthode de mesure du flux lumineux (HOVILA et al., 2004), mise en œuvre au moyen d'une sphère intégratrice de 1.5 mètre de diamètre (cf. Rapport Annuel 2006). Ces dernières ont été complétées par des mesures de consommation énergétique des sources artificielles, tenant compte de leurs équipements auxiliaires (ballasts et dispositifs d'amorçage).

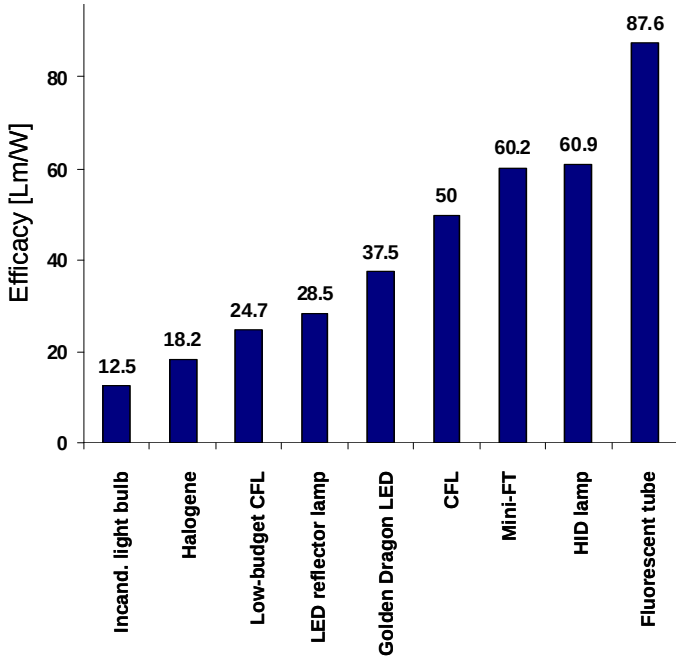



Figure 1 : Efficacité lumineuse de différentes sources de lumière artificielle (y.c. équipements auxiliaires) mesurées par l'intermédiaire d'une sphère intégratrice.

La Figure 1 illustre ces résultats expérimentaux et montre l'importante dispersion des valeurs d'efficacité lumineuse observées. Le choix d'une source d'éclairage artificiel a été porté pour cette raison sur des tubes fluorescents de nouvelle génération (tubes T5 de 8 mm de diamètre).

L'analyse des performances de différents luminaires a montré, par ailleurs, que des rendements optiques extrêmement élevés sont atteints par des dispositifs d'éclairage artificiel basés sur l'optique non-imageante (WELFORD and WINSTON, 1989). La Figure 2 illustre un tel luminaire (Tulux Zen 3, rendement optique de 96%), dont les performances sont supérieures à celle d'un appareil d'éclairage courant (Regent Lip, rendement optique de 69%), qui équipe actuellement les locaux du bâtiment solaire expérimental LESO situé sur le campus de l'EPFL.



Figure 2 : Luminaires artificiels à haut rendement optique : (Gauche) Regent Lip (Regent Lighting, 2007), (Droite) Tulux Zen 3 (Tulux Licht/Lumière, 2007).

L'optique non-imageante, sur laquelle sont basés les développements de dispositifs anidoliques, a été préférée à toute autre stratégie d'éclairage naturel en raison de ses performances lumineuses élevées (SCARTEZZINI and COURRET, 2002). Des dispositifs anidoliques intégrés en façade (cf. Figure 3) équipent par ailleurs le bâtiment solaire expérimental LESO, offrant ainsi d'excellentes conditions d'éclairage naturel aux locaux concernés (facteur de lumière du jour compris entre 2% et 6.5%).

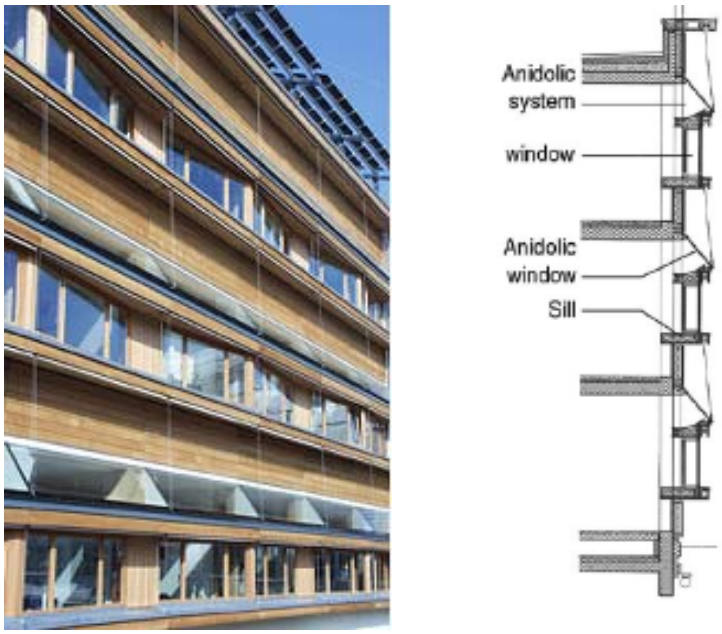



Figure 3 : Dispositifs anidoliques intégrés en façade : (Gauche) Vue extérieure du bâtiment solaire expérimental LESO ; (Droite) Principes de fonctionnement du dispositif (coupe verticale)

Une première campagne de mesure des performances globales (performances lumineuses et énergétiques) des dispositifs d'éclairage artificiel, équipant actuellement le bâtiment expérimental, a été réalisée au cours de l'année écoulée. Quinze locaux de bureau, pourvus d'installations d'éclairage direct (cf. Figure 2, Gauche) et indirect, ont été ainsi examinés. La Figure 4 illustre les puissances électriques spécifiques de ces dispositifs d'éclairage (« Lighting Power Density »), qui sont comprises entre 4.5 W/m$^2$ (« Best Practice ») et 13.7 W/m$^2$ (« Task Lighting w/ incandescent Light Bulbs »). Il apparaît ainsi qu'une utilisation très rationnelle de l'énergie électrique peut déjà être atteinte par certains équipements actuels d'éclairage artificiel (mode d'éclairage direct, deux luminaires Regent Lip 36 W).

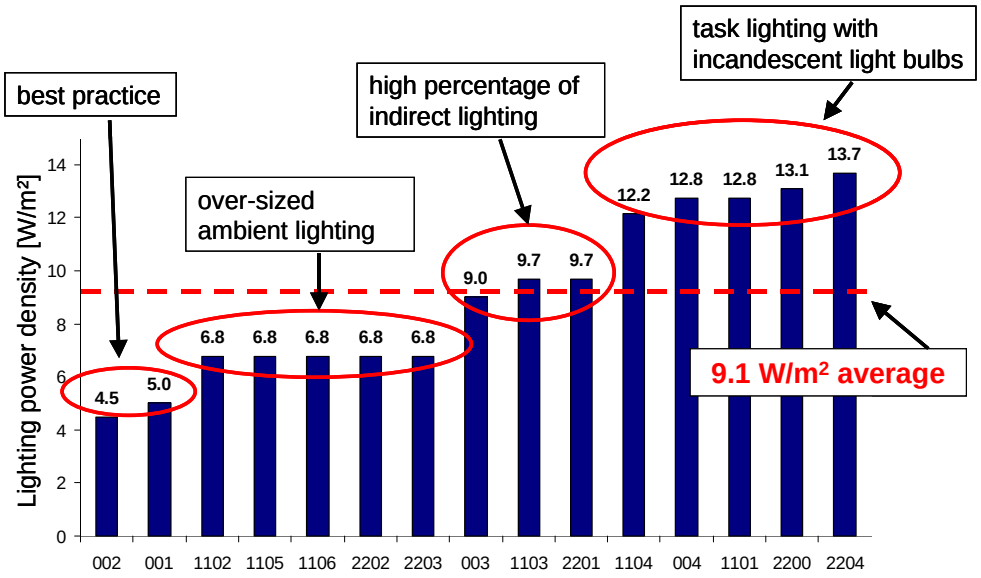



Figure 4 : Puissances électriques spécifiques des dispositifs d'éclairage artificiel actuels équipant les locaux du bâtiment solaire expérimental LESO (15 locaux de bureau)

L'analyse des prestations en éclairage artificiel dans les différents locaux a été menée, par ailleurs, afin de comparer l'efficience des divers modes d'éclairage utilisés (principalement mode d'éclairage direct et indirect). La Figure 5 illustre l'éclairement horizontal atteint au niveau du plan de travail par l'installation d'éclairage électrique la plus efficiente, correspondant à une puissance spécifique de 4.5 W/m$^2$ (cf. Figure 4, « Best Practice »). Celle-ci se distingue par un éclairement horizontal moyen relativement faible sur le plan de travail et à proximité de la fenêtre (éclairement moyen de 168 Lux) : celui-ci est toutefois largement compensé par les prestations en éclairage naturel provenant du dispositif anidolique en façade.

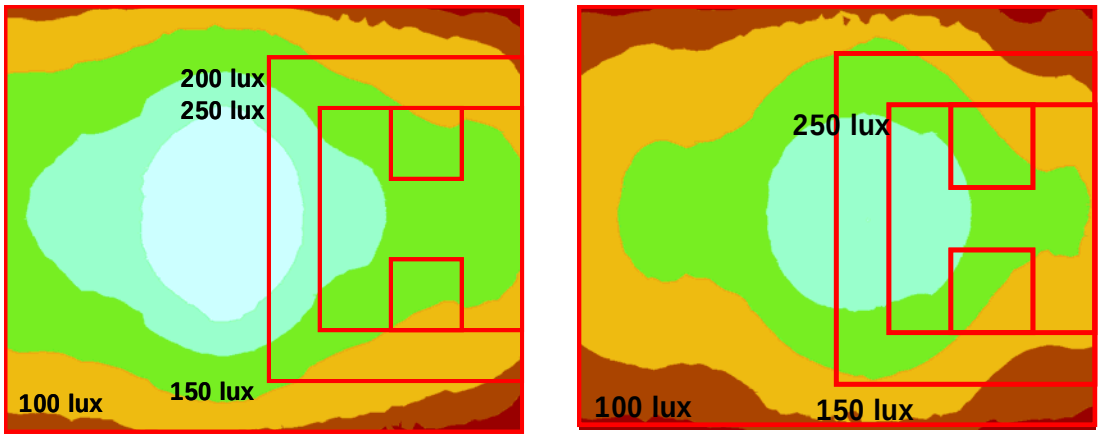
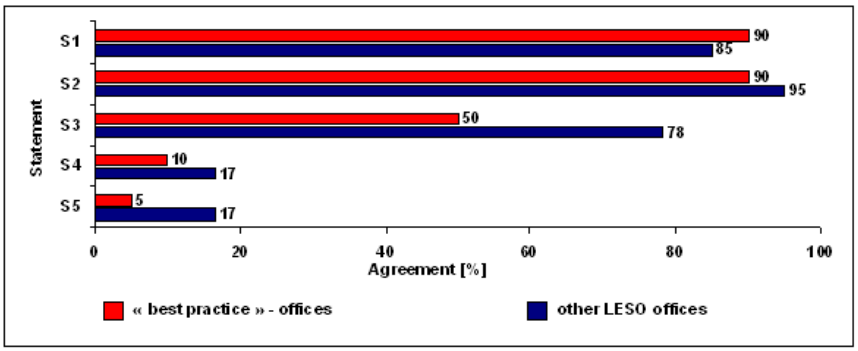



Figure 5 : Eclairement lumineux horizontal au niveau du plan de travail du à des dispositifs d'éclairage artificiel à haut rendement : (Gauche) Mode direct « Best Practice », deux luminaires Regent Lip 36 W, puissance spécifique de 4.5 W/m$^2$ ; (Droite) Mode direct « Low Lighting Power Density », deux luminaires Tulux Zen 3 28 W, puissance spécifique de 3.5 W/m$^2$.

Une étude de satisfaction des usagers, menée par l'intermédiaire de questionnaires, indique qu'une appréciation favorable des conditions d'éclairage artificiel est toutefois exprimée par les usagers du local muni du dispositif d'éclairage artificiel le plus efficient (« Best Practice », puissance spécifique de 4.5 W/m$^2$). Des degrés de satisfaction extrêmement élevés (supérieures à 85%) ont ainsi été observés dans ces locaux : ces derniers sont comparables aux valeurs observées dans les locaux munis d'équipements d'éclairage artificiel moins performants sur le plan énergétique (cf. Figure 6).




- S1: "The lighting in my office is comfortable"
- S2: "The electric lighting system in my office is able to supply enough light"
- S3: "The lamps in my office are at the right place"
- S4: "I often have the impression that there is not enough light on my workplace"
- S5: "My office often seems too dim"

Figure 6 : Degré de satisfaction des usagers, observés dans les différents locaux du bâtiment expérimental LESO (y.c. « Best Practice ») et évalués par l'intermédiaire de questionnaires.

**L'intégration optimale de dispositifs d'éclairage naturel et artificiel** est prévue dans une première étape par simulation numérique. Le programme de calcul d'éclairage artificiel Relux Vision (RELUX INFORMATIK, 2007), basé en grande partie sur le logiciel de simulation numérique Radiance, a ainsi été utilisé pour élaborer un modèle virtuel des locaux de bureau dans lesquels ces dispositifs d'éclairage seront mis en service. La Figure 7 illustre l'un de ces locaux, situé au rez-de-chaussée du bâtiment solaire expérimental LESO, pourvu de dispositifs anidoliques d'éclairage naturel en façade.



Figure 7 : Modèle numérique d'un local d'expérimentation élaboré à l'aide du programme de simulation d'éclairage Relux Vision

Une première étude de simulation menée à l'aide de ce logiciel montre que des puissances spécifiques extrêmement faibles peuvent être atteintes dans ces locaux, en ce qui concerne l'éclairage artificiel. Des valeurs comprises entre 2.6 et 3.5 W/m$^2$ ont ainsi été mises en évidence en cas d'utilisation de luminaires artificiels à très haut rendement, tels que présentés à la Figure 2 (Droite). **La réalisation en vraie grandeur et la mise en œuvre d'un tel dispositif intégré d'éclairage naturel et artificiel** dans l'un des locaux du bâtiment expérimental LESO est prévue dans le cadre du projet. L'évaluation « in-situ » des performances énergétiques et lumineuses de cette installation expérimentale permettra ainsi de valider cette nouvelle approche.

Ces premiers résultats ont fait l'objet de plusieurs publications scientifiques dans des conférences nationale et internationale à comité de lecture (CISBAT 2007, SPIE 2007, PLEA 2007). Une présentation sur invitation a été effectuée, par ailleurs, dans le cadre du « International Workshop on Non-Imaging Optics 2007 », organisé conjointement par University of California Merced (UCM) et la société Sciences Applications Industry Corporation (SAIC) situées en Californie (USA).

### B. "Future Lighting Technologies"

L'étude des perspectives futures, offertes par de nouvelles technologies d'éclairage, a été entreprise en collaboration avec les partenaires de l'**IEA ECBCS Annex 4545 « Energy Efficient Electric Lighting of Buildings »**. Plusieurs types de sources lumineuses ont été considérées dans ce cadre, et en particulier :

- les diodes électroluminescentes blanches (LUXEON White V LED);
- les sources fluorescentes planes (PLANON Xenon Excimer Flat);
- les diodes électroluminescentes organiques (OLED).

Un certain nombre de nouvelles sources artificielles a été acquis en vue de l'évaluation de leur performance lumineuse (OSRAM, 2007) (LUMILED, 2007) (HUNG et al, 2002). La mesure de leur efficacité lumineuse, effectuée à l'aide d'une sphère intégratrice (cf. Figure 1), indique toutefois des valeurs encore insuffisantes par comparaison avec des sources lumineuses conventionnelle (tubes fluorescents par exemple). L'études des possibilités offertes par les diodes électroluminescentes en matière d'éclairage de bureaux est actuellement en cours par l'intermédiaire de simulations numériques (GABRANI, 2007).

## Collaboration nationale

Une collaboration a été établie sur le plan national avec différents laboratoires de recherche, ainsi qu'avec divers partenaires industriels. C'est le cas, en particulier, des entreprises et institutions suivantes :

- **Regent Lighting SA** pour ce qui concerne la mise en œuvre de luminaires d'éclairage artificiel performants (Regent Lip);

- **Tulux Licht/Lumière SA** en ce qui concerne la mise en œuvre de luminaires d'éclairage artificiel à haut rendement (Tulux Zen 3) ;

- **Philips Lighting SA** pour ce qui concerne la fabrication industrielle et la diffusion commerciale de diodes électroluminescentes (LumiLED)

- **Laboratoire d'Opto-électronique des Matériaux Moléculaires (LOMM) de l'EPFL** en ce qui concerne la recherche et le développement de diodes électroluminescentes organiques (OLED);

- **Relux Informatik AG** pour ce qui concerne la mise en œuvre du logiciel de simulation d'éclairage Relux Vision.

Des échanges d'informations ont lieu, par ailleurs, avec le Dr G. Courret de la HES-SO/EIVD (ancien doctorant au LESO-PB/EPFL), responsable d'un projet portant sur l'étude et le développement d'une nouvelle source de lumière artificielle à haute efficacité lumineuse utilisant un gaz de souffre. Une coordination a lieu, par ailleurs, avec ce dernier en ce qui concerne la participation et la contribution de la Suisse aux tâches de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA).

## Collaboration internationale

La collaboration internationale dans le cadre du projet se limite à une participation à l'**IEA ECBCS Annex 45 «Energy Efficient Electric Lighting of Buildings** » : celle-ci est toutefois très modeste en raison des faibles moyens financiers mis à disposition à cet usage par l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN).

Les objectifs de l'Annex 45, dont le déroulement s'étend sur la période 2005-2008, sont les suivants :

- encourager l'utilisation de technologies d'éclairage efficientes du point de vue énergétique;

- évaluer et documenter les performances des technologies actuelles et futures d'éclairage;

- identifier d'éventuelles barrières empêchant la mise en œuvre de ces technologies et proposer des stratégies nouvelles en vue de contourner ces dernières.

La Figure 8 illustre l'organisation adoptée par l'Annex 45 pour atteindre ces différents objectifs.

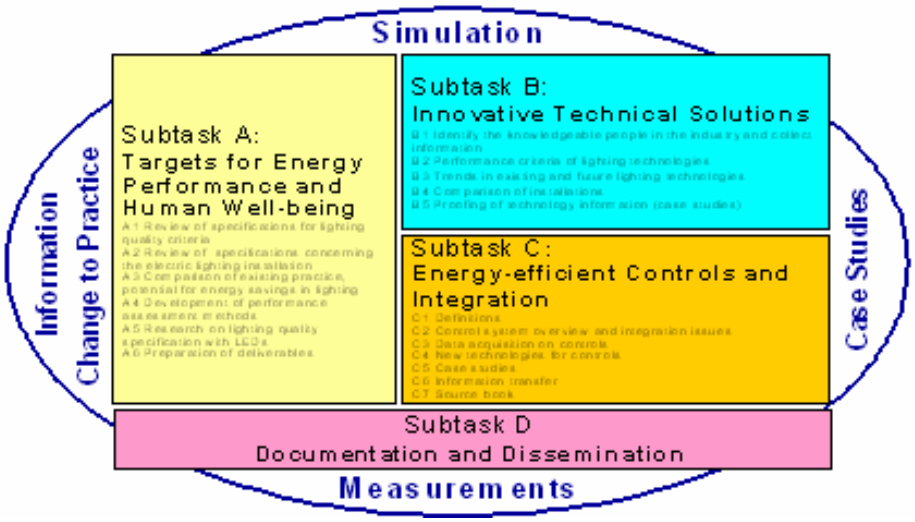



Figure 8 : Organisation de l'IEA ECBCS Annex 45 «Energy Efficient Electric Lighting of Buildings »

La contribution suisse à l'Annex 45 durant la dernière année écoulée se présente comme suit :

**- SubTask B** : Aucun apport spécifique à cette sous-tâche durant l'année 2007

**- SubTask C** : Participation au projet C3 « Case studies on existing and innovative lighting control strategies" sur la base des résultats du projet « GreenLighting »

Ces contributions ont été rendues possible par la participation des acteurs du projet aux réunions de l'Annex 45 organisées en 2007 :

- **5th Expert Meeting**, Belgium Building Research Institute (BBRI), Limelette et St-Stevens-Woluwe (Belgique), 18-20 Avril 2007 (Prof. J-L Scartezzini, F. Linhart)

- **6th Expert Meeting**, Ecole Nationale des Travaux Public de l'Etat (ENTPE), Vaulx-en-Velin (France), 3-5 Octobre 2007 (F. Linhart)

Une étude de cas, obtenue à partir du suivi expérimental du dispositif intégré d'éclairage naturel et artificiel, a été mise au bénéfice de l'Annex 45. Les partenaires de l'Annex 45 ont confirmé par ailleurs leur intérêt en ce qui concerne les développements originaux du LESO-PB/EPFL dans le domaine des dispositifs anidoliques d'éclairage naturel (SCARTEZZINI and COURRET, 2002). L'Annex 45 pourra bénéficier, par ailleurs, des résultats acquis en ce qui concerne la gestion bio-mimétique de l'éclairage électrique, issus d'une thèse de doctorat achevée dans le courant de cette année (LINDELOEF, 2007).

## Évaluation de l'année 2007 et perspectives pour 2008

L'exécution du projet est conforme au plan de travail proposé lors de la soumission de la requête à l'Office Fédéral de l'Energie. Les impératifs liés à l'engagement de collaborateurs scientifiques (recherche d'un candidat de valeur) ont toutefois contribués à retarder le démarrage du projet par rapport au calendrier initial et à différer son exécution.

L'année sous rapport a toutefois permis de consolider les bases scientifiques du projet, en cernant de façon précise les performances actuelles et futures des nouveaux dispositifs naturel et artificiel d'éclairage par le biais de simulations numériques. L'année 2008 permettra de poursuivre la réalisation du projet par le biais de nouvelles étapes d'exécution :

- **l'optimisation finale du dispositif intégré d'éclairage naturel et artificiel**;

- **la réalisation en vraie grandeur et la mise en œuvre du dispositif intégré** dans l'un des locaux du bâtiment expérimental LESO;

- **la mesure des performance énergétiques et lumineuses du dispositif intégré**, ainsi que sa comparaison avec une installation conventionnelle d'éclairage.

Un projet de collaboration scientifique entre l'EPFL et la National University of Singapore (NUS), initié à fin 2007, permettra par ailleurs d'étendre le champ d'investigation du projet GreenLighting à l'étude de stratégies intégrées d'éclairage naturel et artificiel applicables à des locaux de bureau de grande surface (« Open Space Offices»).

## Publication scientifiques


LINDELOEF D., **Bayesian Optimization of Visual Comfort**, PhD Dissertation N° 3918 , ENAC School, EPF-Lausanne, 2007.

GABRANI A., **White LEDs for Office Lighting : Technical Background, available Products and possible Integration**, Internship Project Report, IIT Trainee, LESO-PB/EPFL, 2007.

PAGE J., SCARTEZZINI J.-L., KAEMPF J. AND MOREL N., **On-site performance of electrochromic glazing coupled to an anidolic daylighting system, *Solar Energy,*** 81(9), pp. 1166-1179, Elsevier Science (UK), 2007.

LINHART F. and SCARTEZZINI J.-L., **Efficient lighting strategies for office rooms in tropical climates, *Proc of PLEA 2007 Conference on Passive and Low Energy Architecture***, Singapore, 22-24 November 2007.

LINHART F: and SCARTEZZINI J.-L., **Minimizing connected lighting power in office rooms equipped with anidolic daylighting systems, *Proc. of CISBAT 2007 International Conference on Solar Energy Applications to the Built Environment***, EPF-Lausanne, 4-5 September 2007.

SCARTEZZINI J.-L:, LINHART F and KAEGI-KOLISNYCHENKO E., **Optimal integration of daylighting and electric lighting systems using non-imaging optics, *Proc. of SPIE 2007 Optics & Photonics Conference***, San Diego (USA), 26-30 August 2007.

LINHART F. and SCARTEZZINI J.-L., **Green Lighting project focuses on energy-efficient offices, *SPIE Newsroom***, http://spie.org, September 2007.

SCARTEZZINI J.-L: and LINHART F., **Integrating high-efficiency electric lighting fixtures with anidolic daylighting systems, *International Non-imaging Optics Workshop***, University of California Merced and Science Applications Industry Corporation, San Diego (USA), 28 August 2007.


## Références principales


BERNER D., HOULI H. and L. ZUPPIROLI, **Insights into OLED functioning through coordinated experimental measurements and numerical model simulations, *Phys. Sta. Sol. (a)*,** 202, N° 1, pp. 9-36, 2005.

HOVILA J., TOIVANEN P. and IKONEN E., **Realization of the unit of luminous flux at the HUT using the absolute integrating-sphere method, *Metrologia* 41**, pp. 407-413, 2004.

SCARTEZZINI J.-L., **Advances in Daylighting and Artificial Lighting, Keynote Presentation, *Proc. of 2nd International Building Physics Conference***, September 14.-18., Leuwen (Belgium), 2003.

SCARTEZZINI J.-L. and COURRET G., **Anidolic daylighting systems, *Solar Energy***, 73(2), pp. 123-135, Elsevier Science (UK), 2002.

HUNG L.S., CHEN C.H., **Recent progress of molecular organic électroluminescente materials and devices, *Materials Science and Engineering R 39***, pp. 143-222, 2002.

ANDERSEN M., MICHEL L., ROECKER C. and SCARTEZZINI J.-L., **Experimental assessment of bi-directional transmission distribution functions using digital imaging techniques, *Energy and Building***, 33(5), pp. 417-431, 2001.

SCARTEZZINI J.-L., ANDERSEN M., MICHEL L., ROECKER C. (EPFL) ; BAUMANN H.-P., BRUKHORST R., COLDEWEY H. (Baumann-Hüppe A.G.),. **Bidirectional goniophotometer for the assessment of the luminous properties of fenestration systems**, Scientific Report, p. 80, Lausanne, 2000.

WELFORD W.T. and WINSTON R., **High Collection Nonimaging Optics**, Academic Press Inc., san Diego 8USA), 1989.

## Websites

Philips Lighting, The Lighting Site-Europe, www.eur.lighting.philips.com, 2007.

Regent Lighting, The Regent Lighting World, www.regent.ch, 2007.

Relux Informatik, Light Planning, www.relux.biz, 2007.

Tulux Licht/Lumière, www.tulux.ch, 2007.

OSRAM Lighting, http://www.osram.com, 2007.

LUMILEDS Lighting, http://www.lumileds.com, 2007.