

Initiative pédagogique en éclairagisme,

Un projet collectif innovant

François MAEGHT¹, Cristian. DEMIAN¹, Patrick FAVIER¹, Franck MEURILLON²

francois.maeght@univ-artois.fr

¹ IUT de Béthune, Département GEII, 1230 rue de l'université, 62400 BETHUNE

² S.A.R.L. Concept Energie Lumière - 59850 NIEPPE

RESUME : Cet article présente un retour d'expérience sur une approche pédagogique originale pratiquée au sein du département Génie Electrique et Informatique Industrielle de l'IUT de Béthune. Cette expérience a eu lieu dans le cadre de projets tuteurs qui se déroulent sur une semaine complète et dédiée exclusivement à la réalisation de ces projets. C'est dans ce cadre qu'a été confiée aux étudiants la réhabilitation de l'éclairage de salles de travaux dirigés du département. L'objectif de ce projet était de réaliser un diagnostic photométrique et énergétique de l'existant pour ensuite proposer une solution de rénovation respectant les normes de l'éclairage. Les critères tels que le confort, éblouissement, respect des normes environnementales, bilan énergétique, retour sur investissement, etc, devaient être étudiés afin de produire un rapport complet de type professionnel. Ainsi, 27 étudiants, répartis en 9 trinômes, ont participé à cette semaine intensive. Ils ont eu en charge la réhabilitation et la rénovation de l'éclairage de 5 salles de travaux dirigés. Cette initiative a été fortement appréciée des étudiants de par l'originalité de cette approche pédagogique, ainsi que la façon de travailler sous la forme de microentreprises.

Mots clés : Innovation pédagogique, projets tuteurs, éclairagisme.

1 INTRODUCTION

Dans le cadre des enseignements dispensés au département G.E.I.I. (Génie Electrique et Informatique Industrielle) de l'I.U.T. (Institut Universitaire de Technologie) de Béthune, celui-ci organise un module de formation en éclairagisme. Depuis 1978, ce module se fait en partenariat avec l'A.F.E. (Association Française de l'Eclairage). Entre autre, depuis septembre 2014 l'IUT s'est engagé dans un grand chantier de réhabilitation énergétique de ses bâtiments. Ce chantier inclut un volet éclairagisme comprenant le bilan de l'éclairage existant ainsi que l'étude des améliorations à apporter. Les systèmes de gestion et d'automatisation de l'éclairage sont également étudiés.

Par ailleurs, le département G.E.I.I a initié une nouvelle approche pédagogique en mettant en place une semaine de projet collectif intensif. Cette semaine s'intègre au niveau du programme pédagogique national dans le cadre des projets tuteurs. Durant cette semaine, les étudiants n'ont aucun autre enseignement. Leur emploi du temps est alors exclusivement dédié à la réalisation de ces projets. Le projet se termine par une présentation de la solution retenue devant un jury ou ils défendent et argumentent leur choix.

L'éclairagisme et plus particulièrement le domaine de l'éclairage intérieur des bâtiments se prête parfaitement bien à la mise en œuvre de ce type de projet collectif et intensif. En effet, les étudiants travaillent par équipe de trois sous la forme de microentreprise. Ils doivent alors s'approprier des connaissances nouvelles, faire des choix parmi différentes solutions techniques, les mettre en œuvre pour un chantier de réhabilitation et enfin, ils doivent faire une proposition commerciale pour la rénovation de l'éclairage.

On peut noter que ce projet est le fruit d'une collaboration entre plusieurs partenaires académiques : le département G.E.I.I. de l'I.U.T. de Béthune, l'Association Française de l'éclairage ainsi que la société Concept Energie Lumière.

Dans cet article, nous présenterons dans un premier temps la mise en œuvre et le déroulement de ce projet collectif. Puis, dans un second temps, les résultats obtenus par un groupe d'étudiants à l'issue de ce projet seront développés. Enfin, le retour d'expérience en termes d'évaluation des connaissances et des compétences, sera également abordé.

2 MISE EN ŒUVRE DU PROJET

2.1 Constitution des équipes

Cette semaine de projet collectif et intensif, se déroule à la fin du premier semestre. A ce moment de l'année, les étudiants de première et de seconde année, prennent tous part aux projets. La constitution des équipes a pour premier objectif de faire travailler ensemble des étudiants de première et de seconde année. Un second objectif est de mettre les étudiants en situation professionnelle, partant du principe que dans une société, on ne choisit pas toujours les collaborateurs avec lesquels on est amené à travailler.

Un tirage aléatoire a été réalisé lors de la réalisation des équipes afin d'atteindre ces deux objectifs. Ce tirage aléatoire devait toutefois respecter les critères suivants :

- Dans chaque équipe il ne devait y avoir qu'un seul étudiant de seconde année.
- Les étudiants de première année ne devaient pas se retrouver avec leur binôme habituel.

2.2 Intervention professionnelle

Afin de sortir les étudiants du cadre pédagogique 'classique' et de les mettre en situation professionnelle, cette semaine de projet a débuté par l'intervention de M. Meurillon, gérant de la société 'Concept Énergie Lumière' qui est un bureau d'études indépendant en éclairage intérieur et extérieur basé à Nieppe (Nord), France.

M. Meurillon a détaillé le déroulement ainsi que les objectifs attendus lors d'un diagnostic en éclairage [1]. A savoir qu'un diagnostic commence dans un premier temps par la collecte d'information sur site : plans, mesures in situ, vérification des niveaux d'éclairement actuels, des sources et des luminaires installés, des équipements de la salle, du type d'utilisation, etc.

Dans un deuxième temps une analyse de matériel d'éclairage existant, des performances, des coûts énergétiques et de maintenance est réalisée.

Dans un troisième temps, une proposition d'amélioration respectant les axes réglementaires avec l'étude et le chiffrage des performances techniques et énergétique de la rénovation proposée.

Enfin, la synthèse du dossier avec le chiffrage des gains possibles, et les orientations pour la rédaction future d'un cahier des charges.

2.3 Moyens techniques

Les moyens techniques mis à disposition des étudiants permettent d'atteindre deux objectifs. Le premier est de réaliser des manipulations qui leur permettent de s'approprier des unités de l'éclairagisme. Le second étant de mettre à disposition des appareils de mesures permettant de réaliser les mesures photométriques et énergétiques nécessaires à la rédaction du diagnostic.

Chaque groupe d'étudiants s'est vu remettre un luxmètre (fig. 1) permettant de mesurer l'éclairement (E) reçu par une surface. Un luminancemètre (fig. 2) est également à disposition. Cet appareil permet de mesurer la luminance (L) d'une surface (par exemple un mur), grandeur nécessaire pour déterminer le coefficient de réflexion (ρ) d'une surface grâce à la loi de Lambert [2].

$$\rho E = L\pi \quad (1)$$



Fig. 1 : luxmètre



Fig. 2 luminancemètre

Le département G.E.I.I. possède également une sphère d'intégration (fig. 3). La sphère d'intégration mesure le flux lumineux (Φ) émis par une lampe.



Fig. 3 : sphère d'intégration

Associée à la mesure de la puissance active (P) consommée par la lampe testée - mesure réalisée à l'aide d'un analyseur de réseau - il est possible de déterminer l'efficacité lumineuse d'une lampe exprimée en lumen par watt :

$$\text{efficacité} = \frac{\Phi}{P} \quad (2)$$

Une Salle d'informatique avec à disposition le logiciel DIALux [3] a également été réservée lors de cette semaine de projet. DIALux est un logiciel gratuit de calcul d'éclairage intérieur, extérieur et public. Il permet de réaliser des études d'éclairage de façon professionnelle. Il permet également de déterminer la consommation et les performances énergétiques des projets réalisés.

2.4 Planning de la semaine

Le planning de cette semaine de projet a été mis en œuvre afin de permettre aux différentes équipes de travailler en autonomie. Il est à noter que les étudiants n'ont aucune notion d'éclairagisme au départ de ce projet. Ainsi, des demi-journées de formations et de manipulations ont été insérées dans le planning pour permettre aux étudiants d'acquérir les notions nécessaires à la réalisation de leur diagnostic.

- Jour 1 : conférences, intervention de M. Meurillon, initiation à l'éclairagisme.
- Jour 2 : début des diagnostics, analyse de l'existant et formation d'une demi-journée sur le logiciel DIALux
- Jour 3 : suite du travail en autonomie et recherche d'une proposition de rénovation.
- Jour 4 : suite du travail en autonomie et demi-journée de manipulation et de mesure en éclairagisme.
- Jour 5 : rédaction du rapport et exposé du diagnostic et de la rénovation proposés devant un jury.

3 RESULTATS OBTENUS

Dans ce chapitre nous allons présenter un exemple de diagnostic obtenu par un des groupes d'étudiants. Les résultats ont été obtenus en suivant la démarche préconisée par M. Meurillon lors de sa conférence donnée le premier jour.

3.1 Prescriptions

La norme NFC12464-1[4] relative à l'éclairage impose les valeurs d'éclairement à respecter pour ce type de local. Le tableau 5.36.2 - *Salles de classe pour les cours du soir et enseignement aux adultes* – donne les préconisations suivantes :

- Eclairement moyen : $E_{moy} = 500lx$
- Eblouissement : $UGR \leq 19$
- Uniformité : $U_0 \geq 0,6$
- Indice de Rendu de Couleur $Ra \gg 80$

L'UGR (Unified Glaring Rate) exprimant la probabilité d'un éblouissement par une association de plusieurs luminaires ; l'UGR étant compris entre 10 (pas éblouissant) et 30 (très éblouissant). La norme recommande également une uniformité $U_0 = E_{min}/E_{moy}$ spécifique supérieure à 0,6. En ce qui concerne l'indice de rendu de couleur Ra (ou IRC) la valeur maximale est de 100. La qualité du rendu des couleurs est directement proportionnelle au chiffre mentionné. Dans les espaces où les personnes travaillent de longues durées, il est conseillé d'utiliser des lampes avec un rendu de couleur > 80 .

Pour garantir une ambiance lumineuse satisfaisante dans un local, on peut utiliser le critère de Kruithof [5] qui préconise une température de couleur des sources en fonction du niveau d'éclairement visé. Ainsi on peut rajouter comme préconisation :

- Température des sources $T^{\circ}K \in [3000K, 4000K]$

Enfin, en ce qui concerne la performance énergétique, l'article 44 de l'arrêté N°72 du 22 mars 2017 [6] stipule que pour toute nouvelle installation d'éclairage, la puissance installée (appelée aussi efficacité énergétique) doit être inférieure à $1,6W/m^2/100lux$.

- $Pe \leq 1,6 W/m^2/100lux$

3.2 Analyse de l'existant

La salle étudiée dans cet article est la salle d'enseignement H1.10 du département G.E.I.I de l'I.U.T. de Béthune. Les caractéristiques de la salle sont les suivantes :

- Longueur $a=10,5m$ et largeur $b=7m$. Hauteur du local $H_t=2,75m$.
- 12 luminaires $4 \times 18W/1350lm$ tubes fluo 840 à ballast ferromagnétique – puissance d'un luminaire : $88W$ - classe UTE 0,64C.
- Sur les 48 tubes fluorescents installés, seuls 43 tubes fonctionnent.
- Les facteurs de réflexion du plafond $\rho_1=0.7$, des murs $\rho_3=0.5$, et du plan utile $\rho_4=0.3$ donnent un groupement des facteurs de réflexion de 753.

3.2.1 Mesures d'éclairement

Un système de maillage d'éclairage doit être créé pour indiquer le nombre de points de mesure [4].

En posant d la plus grande longueur et ρ la taille maximale de la grille, il convient de calculer :

$$\rho = 0,2 \times 5^{\log(d)} \quad (3)$$

On trouve une taille de maille $\rho = 1,03 m$.

Le nombre de points de mesure (Npm) est indiqué par l'entier supérieur de la valeur d/ρ

$$Npm = E(d/\rho) + 1(4)$$

On trouve un nombre de points sur la longueur égal à 11 avec un maillage de $\rho = 0,95m$. Le maillage sur la largeur donne alors 7 points espacés de $\rho = 1m$.

La fig. 4 donne les résultats de la campagne de mesure.

120	200	220	210	210	210	250	240	230	200	170
180	320	350	310	330	330	380	400	340	350	260
200	340	360	360	430	420	440	470	410	420	300
180	300	310	350	450	450	450	500	450	460	300
170	290	300	350	420	470	520	600	520	550	300
150	270	290	320	400	430	510	575	500	560	350
130	220	250	270	330	370	450	500	445	440	280

Fig 4 : Mesure des éclairements

Les mesures ont permis de trouver l'éclairement moyen de la salle $E_{moy} = 346 lux$ avec une valeur minimale dans un coin qui descend à $E_{min} = 120 lux$. Soit une uniformité $U_0=0,35$.

3.2.2 Mesure de la consommation électrique

Les mesures de consommations électriques ont été réalisées en deux temps. Un premier essai a été effectué en laboratoire sur un luminaire seul. Les mesures sont présentées à la figure 5.

On peut relever que la puissance active est de $88 W$ avec un facteur de puissance de $0,94$.

Dans un second temps, des mesures (figure 6) ont été faites in situ afin d'avoir la consommation électrique réelle de la salle étudiée.

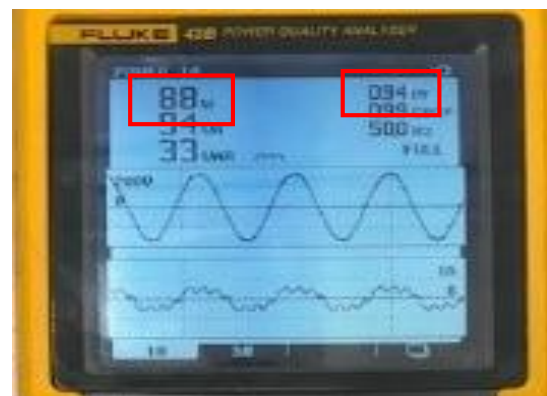


Fig 5 : Consommation d'un luminaire

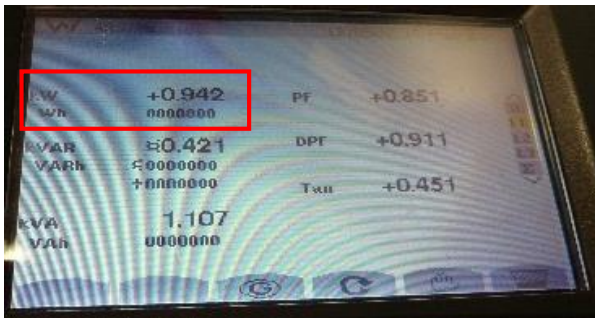


Fig 6: Consommation électrique de la salle étudiée

En prenant les valeurs théoriques (à 88W par luminaire), on devrait avoir une puissance active $P = 12 \times 88 = 1056W$. Or la puissance consommée par la salle est de seulement 942W.

La différence entre ces deux valeurs peut s'expliquer par le fait que 43 tubes sur 48 tubes fonctionnent lors des mesures. Si on applique une correction sur les valeurs théoriques on peut estimer la consommation de la salle à $P = 942 \times \frac{48}{43} = 1051W$.

En appliquant cette correction, Les résultats obtenus sont alors très proches et cohérents.

Le bilan énergétique peut alors être calculé et donne les résultats suivants :

La puissance surfacique : $Ps = 14,3W/m^2$

L'efficacité énergétique : $Pe = 4,13W/m^2/100lux$

3.2.3 Simulation sous DIALux

L'éclairage de la salle étudiée dans son état actuel a été simulé afin de conforter les résultats obtenus lors de la campagne de mesures. N'ayant pas les références des luminaires installés, pour la simulation, nous avons utilisé des luminaires dont les caractéristiques s'en approchaient le plus possible. Ainsi, les luminaires choisis sont des Thorn CINQLINE 4x14W. La puissance consommée a été modifiée à 88W par luminaire, le flux lumineux a également été modifié à 4300 lm afin de tenir compte du rendement des luminaires. Un facteur de correction égal à $\frac{43}{48} = 0,89$ a été appliqué afin de tenir compte des 5 tubes défectueux.

Le facteur de maintenance a été positionné à 0,74 (maintenance de type B, local propre [7]).

La figure 7 montre un extrait du rapport édité par le logiciel Dialux.

Les résultats obtenus par la simulation donnent :

E_{moy}	375 lux
E_{min}	224 lux
U_0	0.598
UGR	17

En comparant ces résultats avec les mesures, on trouve un écart sur l'éclairage moyen de 8,3% ce qui est acceptable. Quant à la différence sur le critère d'uniformité

U_0 peut s'expliquer par le fait que certains tubes (notamment près des coins) étaient hors service pendant les mesures

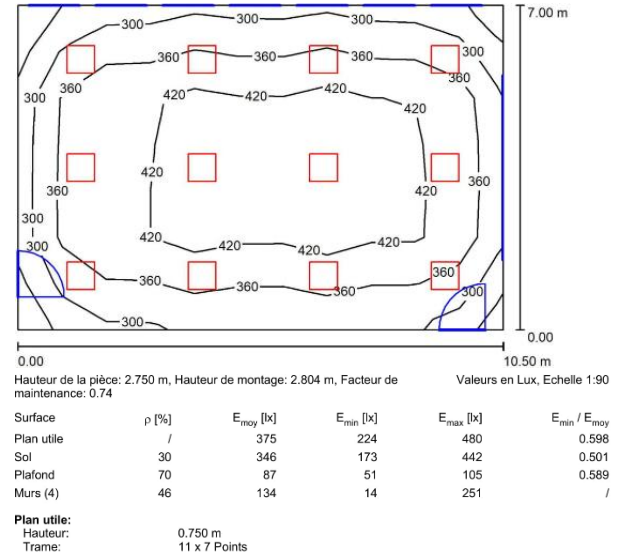


Fig 7 résultats de la simulation salle H1.01 tubes fluorescents

3.2.4 Bilan de l'existant

Le bilan des mesures effectuées donne les résultats suivants :

- Le niveau d'éclairage de 346 lux est bien insuffisant au regard des 500 lux imposés par la norme
- L'uniformité de 0,35 est insuffisante car inférieure à 0,6
- L'indice de confort UGR de 17 est bon car il est inférieur à 19
- Les tubes 840 (soit un rendu de couleur de 80 et une température de couleur de 4000°K) sont conformes aux recommandations.
- Le bilan énergétique est très mauvais car l'efficacité énergétique est de 4,13 W/m²/100lux ce qui est bien au-delà des 1,6W/m/100lux à atteindre dans le cas d'une rénovation.

En conclusion de ces mesures, on peut affirmer qu'une réhabilitation de l'éclairage est plus que nécessaire afin d'améliorer le niveau d'éclairage moyen, l'uniformité et surtout l'efficacité énergétique.

3.3 Nouvelle solution proposée

L'utilisation du logiciel DIALux permet de simuler la rénovation de l'éclairage. Cela permet de tester plusieurs types de luminaires et de comparer les résultats obtenus.

3.3.1 Choix du luminaire

La solution retenue utilise des luminaires à LED de marque Thorn, oméga pro2 3800-840, UTE 1,00C. Le choix s'est porté sur ce luminaire pour les raisons suivantes :

- Il est tout d'abord compatible avec le calepinage (60cm x 60cm) du plafond.

- Son flux lumineux sortant de 3800 lm devrait permettre d'atteindre l'éclairement de 500 lux à maintenir.
- Il a un IRC de 80 et une température de couleur de 4000°K.
- Leur durée de vie importante (50000 heures avec 90% de maintien du flux de LED).
- Il est compatible avec les systèmes de gestion de l'éclairage ce qui permettra d'améliorer l'efficacité énergétique de l'installation
- C'est surtout sa consommation électrique de 27,4W qui a retenu notre attention. Avec une efficacité lumineuse de 139lm/W il permettra sans aucun doute de respecter les nouvelles réglementations énergétiques.
-

3.3.2 Résultats de la simulation

La simulation a été réalisée en remplaçant les luminaires à tube fluorescents par les luminaires à LED. Le facteur de maintenance a été corrigé et ramené à 0,9. Le rapport édité par le logiciel DIALux (figure 8) présente les résultats obtenus par la simulation dans le cadre de cette réhabilitation.

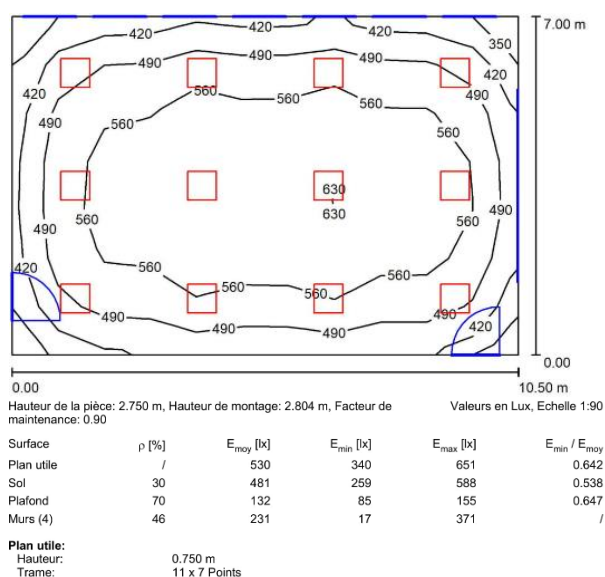


Fig 8: résultats de la simulation salle H1.01 à LED

À partir de ce rapport, nous pouvons considérer les résultats suivants :

E_{moy}	530 lux
E_{min}	340 lux
U_0	0,64
UGR	18

Le bilan énergétique donne les valeurs suivantes :

La puissance surfacique : $P_s = 4,47W/m^2$

L'Efficiency énergétique : $Pe = 0,84W/m^2/100lux$

3.3.3 Bilan

Le bilan de la simulation effectuée donne les résultats suivants :

- Le niveau d'éclairement de 530 lux est suffisant et respecte les 500 lux imposés par la norme.
- L'uniformité de 0,64 est correcte (supérieure à 0,6)
- L'indice de confort UGR de 18 est bon car il est inférieur à 19 .
- L'IRC de 80 et la température de couleur de 4000°K sont conformes aux recommandations.
- Le bilan énergétique est excellent car l'efficacité énergétique est de 0.84 W/m²/100lux ce qui est bien en-deçà des 1,6W/m/100lux à atteindre dans le cas d'une rénovation.
- La puissance de l'installation passe alors de 1056W à 329W ce qui représente 31% de la puissance actuelle.

Grâce au logiciel Dialux, il est possible de donner un aperçu en vue 3D du résultat. Celui-ci est présenté à la Fig 9.



Fig 9 : Vue 3D de la modélisation de la salle

Cette vue 3D peut être comparée à la photo actuelle de la salle (figure 10)

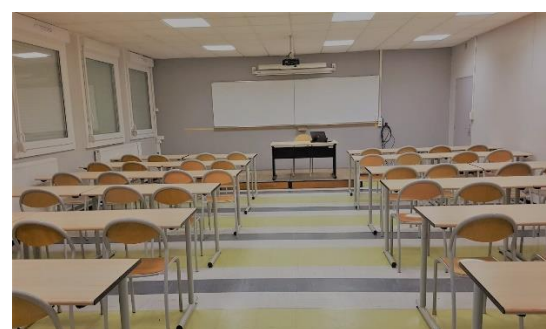


Fig 10: photo de la salle actuelle

3.4 Bilan énergétique

La norme NF EN 15193[6] propose un très bon outil d'évaluation de l'énergie consommée dans des cas complexes incorporant la lumière du jour et la gradation. Le LENI (Lighting Energy Numeric Indicator) est défini

comme indicateur de comparaison. Il est exprimé en kWh/m²/an). Pour un local, l'énergie totale WL_t est calculée par :

$$WL_t = P_n \cdot F_c \cdot [(T_D \cdot F_o \cdot F_D) + (T_N \cdot F_o)] / 1000 \quad (5)$$

P_n est la puissance totale installée.

F_c est le facteur de correction de la puissance totale lorsqu'une régulation est en service $F_c = (1+M)/2$

T_D est la durée de fonctionnement de l'éclairage durant le jour

T_N est Durée de fonctionnement de l'éclairage en l'absence de lumière du jour

F_o : Facteur d'occupation

F_D : Facteur de dépendance

Le tableau suivant permet de calculer les gains énergétiques lors d'une rénovation avec et sans régulation de l'éclairage.

La consommation est alors donnée par :

$$Ce = (WL_t) / S \quad (6)$$

	Situation actuelle	Rénovation LED
Flux des lampes	5400 lm	3800 lm
Eclairement à maintenir	375 lux	530 lux
Puissance d'un luminaire	88 W	27,4 W
Puissance totale installée	1056 W	329 W
Puissance surfacique	14,4 W/m²	4,47 W/m²
Efficacité énergétique	3,84 W/m²/100lux	0,84 W/m²/100lux
Consommation (2000H/an)	2112 KWh/an	658 KWh/an
GAIN (sans regulation)	Base=2112 KWh/an	69%
CONSO LENI		
TD	1800 h	1800
TN	200 h	200
FD	1	0.8
FO	1	0.9
FC	1	0.95
W_{LENI}	2112 KWh/an	461 KWh/an
$Ce = W_{LENI} / S$	29KWh/m²/an	6,2KWh/an/m²
GAIN suivant le critère LENI	Base = 2112 KWh/an	78%

Au regard de ces chiffres, il est possible de calculer le gain financier dans le cas d'une rénovation. En considérant un coût de 0,15€/KWh. L'économie réalisée serait de 217€ pour une nouvelle installation sans régulation et une économie de 247€ pour une nouvelle installation avec régulation d'éclairage.

4 CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article une nouvelle approche pédagogique basée sur l'éclairagisme à laquelle 27 étudiants de première et seconde année ont pris part. Ce projet a été intensif, puisqu'il s'est déroulé sur une semaine à plein temps.

Le retour d'expérience des étudiants est assez positif. Il montre que le domaine de l'éclairagisme et plus particulièrement celui de la réhabilitation de l'éclairage est un formidable outil pluridisciplinaire.

En effet, dans un premier temps, il fait appel à de nombreuses notions nouvelles que les étudiants ont dû s'approprier (telles que les unités de l'éclairage, l'apprentissage d'un nouveau logiciel, le respect des normes, ...). Dans un second temps, ce projet a permis aux étudiants d'appliquer à un cas concret des connaissances acquises lors de leur formation (puissances électrique, énergie, mesure, ...)

Enfin, le fait de travailler en groupes réalisés de façon aléatoire, a suscité l'apprentissage du savoir-être ainsi que de la gestion de projet.

Les difficultés remontées par les étudiants résident dans le fait qu'ils ont eu très peu de temps pour s'approprier un nouveau domaine d'étude tel que l'éclairagisme. Le manque de recul s'est fait ressentir notamment dans l'apprentissage de nouvelles unités. Par ailleurs, la première journée de cette semaine de projet est assez lourde puisqu'elle n'est constituée que de conférences. Cependant, une fois ces difficultés passées, les journées de travail qui ont suivies, avec le travail en groupe et en autonomie, ont montrées de belles motivations.

Bibliographie

[1] <http://www.conceptenergielumiere.fr>

[2] Vandeplanque P (2005). « L'éclairage : notions de base, projets d'installations, exercices corrigés ». Paris Tec & Doc.

[3] <https://www.dial.de/fr/home>

[4] AFNOR - NF EN 12464-1 Juillet 2011. « Lumière et éclairage - Éclairage des lieux de travail - Partie 1 : lieux de travail intérieurs »

[5] Journal Officiel. Arrêté du 22 mars 2017 modifiant l'arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existant

[6] Kruithof AA (1941), « Tubular luminescence lamps for general illumination », Philips Technol. Rev. 6 (3): 65-96

[7] AFNOR - NF EN 15193-1 Mai 2017 – « Performance énergétique des bâtiments - Exigences énergétiques pour l'éclairage - Partie 1 : spécifications, module M9 »