

Ecole d'ingénieurs du canton de Vaud
Institut d'Automatique Industrielle
Route de Cheseaux 1
CH-1401 Yverdon-les-Bains
Tél. : 024 / 423 23 90
Fax : 024 / 423 31 15
Direct : 024 / 423 23 14

Société **Lexen SA**
M. Kurt HIRSCHI

CH-1072 Forel (Lavaux)

VALIDATION D'UN ÉCONOMISEUR D'ÉNERGIE *DANS LE DOMAINE DE L'ÉCLAIRAGE*

i nstitut d'
Automatisation
i ndustrielle



T A B L E D E S M A T I E R E S

	<u>PAGE</u>
1. INTRODUCTION	2
1.1 BUT DU MANDAT	2
1.2 PRINCIPE DE L'ÉCONOMISEUR.....	3
1.2.1 Généralité	3
1.2.2 Cas d'une charge purement ohmique et indépendante de la tension appliquée.....	3
1.2.3 Cas d'une impédance quelconque variant avec la tension appliquée	5
2. MÉTHODES DE MESURE.....	6
2.1 GRANDEURS ÉLECTRIQUES.....	6
2.2 ÉCLAIREMENT	6
2.3 TEMPÉRATURE	6
3. MESURES EN LABORATOIRE	7
3.1 CARACTÉRISATION DES SOURCES LUMINEUSES SEULES	7
3.1.1 Ampoules standards à incandescence et lampe économique (à ballast intégré).....	7
3.1.2 Lampes haute pression à vapeur de mercure	11
3.1.3 Lampes haute pression à vapeur de sodium	13
3.1.4 Lampe aux halogénures métalliques	16
3.1.5 Lampe fluorescente	17
3.2 ÉCONOMIE ATTENDUE POUR LES DIVERSES SOURCES MESURÉES	19
3.3 MESURE DU LEC-25 MONOPHASÉ 10A SUR LAMPES À INCANDESCENCE	22
3.3.1 Mesure des performances	22
3.3.2 Contrôle de l'affichage.....	25
3.4 MESURE DU LEC-A TRIPHASÉ 3 x 30A SUR LAMPES À INCANDESCENCE	26
3.4.1 Mesure des performances	26
4. CONCLUSIONS.....	29
RÉFÉRENCES	31
ANNEXE - INVENTAIRE DES LAMPES ET DES BALLASTS UTILISÉS	32

1. INTRODUCTION

1.1 BUT DU MANDAT

Le but du mandat est de mesurer de manière impartiale les performances d'un dispositif d'économie d'énergie électrique dans le domaine de l'éclairage. Le travail a été divisé en 4 modules, (désignés sous WP : *Work Packages*) résumés comme suit :

- WP1 : Définition des critères et méthodes pour assurer des mesures reproductibles.
- WP2 : Essais en laboratoire.
- WP3 : Essai sur installation fixe.
- WP4 : Définition d'un protocole pour permettre aux installateurs / clients de mesurer l'économie réalisée.

Ce rapport correspond aux modules WP1 et WP2.

Pour les détails de la partie commerciale du mandat, prière de se reporter à l'offre MCN_LEX-001 du 15 mars 2004 (Réf. 1 & 2).

Le principe de l'économiseur est basé sur un abaissement de la tension du réseau électrique alimentant les lampes. En effet, il arrive fréquemment que la tension dépasse la valeur nominale de 230 V_{AC}, entraînant un accroissement de la consommation. De plus, les lampes étant faites en général pour tolérer des fluctuations de $\pm 10\%$, il est donc possible de les alimenter avec une tension stabilisée à 90% de la valeur nominale soit 207 volts, tout en donnant une luminosité conforme aux besoins de l'utilisateur.

L'abaissement de tension a également un effet favorable sur la durée de vie des lampes en raison de la diminution de la température de fonctionnement. La stabilisation et le filtrage de la tension par l'économiseur sont également des facteurs qui contribuent à prolonger la durée de vie des lampes, donc à diminuer les frais d'entretien du système d'éclairage.

L'organisation du rapport suit la définition des modules de travail. L'économie de consommation dépendant du type de sources lumineuses utilisées, un certain nombre de sources doivent tout d'abord être caractérisées. Sur cette base il sera possible d'anticiper la réduction de consommation (économie) et d'interpréter les mesures de consommation électrique dans les différents cas. Pour les lampes à décharges, les caractéristiques dépendent également du type de ballast. Les combinaisons lampes/ballasts utilisées pour cette étude sont inventoriées en annexe.

1.2 PRINCIPE DE L'ÉCONOMISEUR

1.2.1 Généralité

Le schéma de principe est illustré sur la Figure 1-1. Le secondaire du transformateur est utilisé pour réduire la tension appliquée à la charge, ce qui a pour effet de baisser sa consommation.

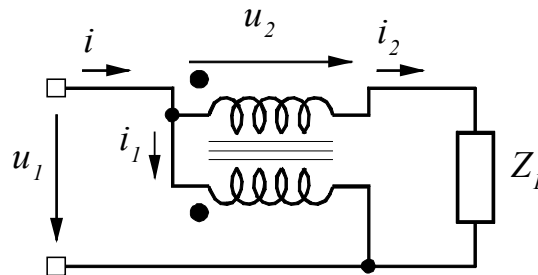


Figure 1-1 : Schéma de principe

Rapport de transformation (cas idéal : pas de courant magnétisant) :

$$u_2 = \frac{n_2}{n_1} u_1 = m u_1 \quad 1.1$$

$$i_2 = \frac{n_1}{n_2} i_1 = \frac{1}{m} i_1$$

1.2.2 Cas d'une charge purement ohmique et indépendante de la tension appliquée

Relation entre courants

$$i = i_1 + i_2 \quad 1.2$$

Relation entre tensions, en posant $Z_L = R = \text{constante}$

$$u_1 = u_2 + R i_2 \quad 1.3$$

Des relations 1.1 et 1.3, on en déduit le courant i_2 .

$$i_2 = \frac{u_1 - u_2}{R} = (1 - m) \frac{u_1}{R} \quad 1.4$$

La puissance dissipée dans la charge est donnée par la relation

$$P_L = R i_2^2 = (1 - m)^2 \frac{u_1^2}{R} \quad 1.5$$

Sans économiseur, on a

$$P_L' = \frac{u_1^2}{R} \quad 1.6$$

L'économie de puissance consommée se calcule de la manière suivante

$$\gamma = \frac{P_L' - P_L}{P_L'} = 1 - (1 - m)^2 \quad 1.7$$

En admettant une tension de sortie constante de $u_2 = 207\text{V}$, on peut déterminer l'économie théorique d'énergie réalisée

u_1 [V]	$u_1 - u_2$ [V]	$1 - m$ [1]	γ [%]
200	207	1.04	-7.1%
210	207	0.99	2.8%
220	207	0.94	11.5%
230	207	0.90	19.0%
240	207	0.86	25.6%

Tableau 1-1 Economie d'énergie (cas théorique)

La Figure 1-2 illustre le tableau Tableau 1-1

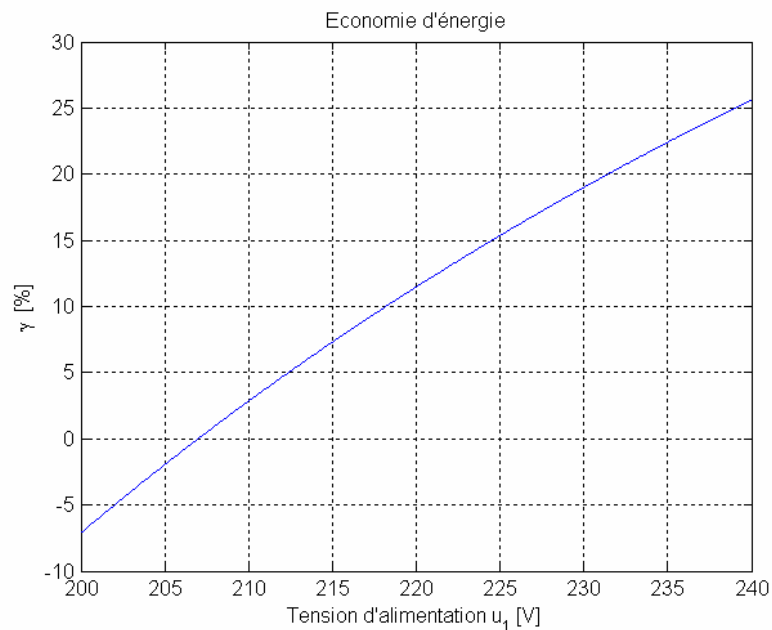


Figure 1-2 : Economie d'énergie sur charge résistive avec un tension $u_2 - u_1$ de 207V

1.2.3 Cas d'une impédance quelconque variant avec la tension appliquée

En pratique, la charge varie avec la température et par conséquent avec la tension à ces bornes. Dans ce cas, il faut réécrire les équations 1.5 et 1.6 en introduisant les impédances $Z_L(u_1)$ et $Z_L(u_1-u_2)$ respectivement.

Puissance dissipée dans la charge :

$$P_L = \text{Re}(UI^*) = (1 - m^2) \text{Re}\left(\frac{UU^*}{Z^*}\right) = (1 - m^2) \frac{(u_1 - u_2)^2}{|Z(u_1 - u_2)|} \cos \varphi_{12} \quad 1.8$$

Sans économiseur :

$$P'_L = \text{Re}(UI^*) = \text{Re}\left(\frac{UU^*}{Z^*}\right) = \frac{u_1^2}{|Z(u_1)|} \cos \varphi_1 \quad 1.9$$

Economie réalisée :

$$\gamma = \frac{P'_L - P_L}{P'_L} = 1 - (1 - m^2) \frac{|Z^*(u_1)| \cos \varphi_{12}}{|Z^*(u_2 - u_1)| \cos \varphi_1} \quad 1.10$$

En admettant une charge sous la forme de lampes à incandescence, on obtient les valeurs données dans les deux tableaux ci-dessous.

u_1 [V]	$u_1 - u_2$ [V]	$1-m$ [1]	$R(u_1)$ [Ohm]	$R(u_1 - u_2)$ [Ohm]	γ [%]
200	207	1.04	21.25	21.58	-5.5
210	207	0.99	21.72	21.58	2.2
220	207	0.94	22.19	21.58	9.0
230	207	0.90	22.66	21.58	14.9
240	207	0.86	23.13	21.58	20.3

Tableau 1-2 Economie d'énergie pour $u_1-u_2=207V$, charge purement ohmique (LEC - 25)

u_1 [V]	$u_1 - u_2$ [V]	$1-m$ [1]	$R(u_1)$ [Ohm]	$R(u_1 - u_2)$ [Ohm]	γ [%]
200	205	1.03	21.25	21.48	-3.9
210	205	0.98	21.72	21.48	3.7
220	205	0.93	22.19	21.48	10.3
230	205	0.89	22.66	21.48	16.2
240	205	0.85	23.13	21.48	21.5

Tableau 1-3 Economie d'énergie pour $u_1-u_2=205V$, charge purement ohmique (LEC - A)

2. MÉTHODES DE MESURE

2.1 GRANDEURS ÉLECTRIQUES

Ces mesures ont été réalisées au moyen d'un analyseur de type **Norma D4355** comportant 3 canaux de mesure courant/tension.

Cet appareil permet de mesurer les grandeurs suivantes :

- tension RMS aux bornes de la source lumineuse,
- puissance active fournie à la source lumineuse,
- facteur de puissance ($\cos(\varphi)$),

Le courant RMS ou la puissance réactive peuvent se déduire à partir des 3 grandeurs ci-dessus et ne seront donc pas reportées dans les tableaux de mesures.

2.2 ECLAIREMENT

Pour mesurer la dépendance de la luminosité en fonction de la tension appliquée, l'éclairement à 1 mètre de la source a été mesuré au moyen d'un luxmètre de type **Minolta xy-1**. Cet appareil utilise 2 cellules photoélectriques au silicium qui sont filtrées pour correspondre à la réponse spectrale de l'observateur standard défini par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). Avant le début des mesures, l'étalonnage de l'appareil a été contrôlé à l'EPFL au moyen de sources calibrées.

Les mesures ont été faites dans une chambre noire exempte de toute source de lumière parasite.

Rappel : L'unité d'éclairement est le **lux**, qui est égal à un lumen par mètre carré. L'unité de luminosité, ou puissance lumineuse émise est le **lumen**. Cette puissance correspond à l'énergie rayonnée à l'intérieur du spectre visible.

L'efficacité lumineuse se mesure en **lumen/watt** et sert à caractériser les diverses sources lumineuses. Une source lumineuse qui rayonnerait 100% à l'intérieur du spectre visible aurait une efficacité de **683 lumen/watt**. En pratique, les sources rayonnent une grande partie de leur énergie dans l'infrarouge (ce qui explique les pertes thermiques), et dans l'ultraviolet.

Pour obtenir la puissance lumineuse d'une source avec un luxmètre, il faut intégrer l'éclairement sur 4π stéradians. En pratique, les sources présentent souvent une symétrie axiale et il suffit de mesurer la caractéristique polaire d'émission selon quelques angles. A noter que cette mesure absolue n'est pas strictement obligatoire si l'on ne s'intéresse qu'aux variations relatives de luminosité. Pour les ampoules ordinaires, elle est souvent déjà donnée par le fabricant.

2.3 TEMPÉRATURE

Les mesures de cartographie thermique ont été réalisées au moyen d'une caméra thermique du type **Avio thermal video system** (Inv. EIVD 16M-091).

En général, les mesures de température des sources sont délicates car elles dépendent notamment de la température extérieure et de l'entourage de la source. Pour obtenir des mesures reproductibles, les mesures ont été faites dans un local sans courant d'air (température constante 25°C). Les sources sont exemptes de réflecteur ou d'abat-jour pour que l'air puisse circuler librement. Le coefficient d'émissivité ε a été fixé à 0.5.

3. MESURES EN LABORATOIRE

3.1 CARACTÉRISATION DES SOURCES LUMINEUSES SEULES

Les caractéristiques des sources lumineuses suivantes ont été mesurées :

1. ampoules standard à incandescence et lampe économique (fluorescente compacte avec ballast intégré),
2. lampe haute pression à vapeur de mercure,
3. lampe aux halogénures métalliques,
4. lampe haute pression à vapeur de sodium,
5. lampe fluorescente (tube néon).

Les mesures ont été faites à diverses valeurs de la tension d'entrée : 200, 210, 220, 230, 240 [V_{AC}].

Pour les lampes à décharge, le type de ballast (ferromagnétique ou électronique) joue un rôle.

3.1.1 Ampoules standards à incandescence et lampe économique (à ballast intégré)

Pour ce type de lampe, la puissance lumineuse a été calculée en fonction de diverses mesures spatiales du flux lumineux afin de déterminer la polaire d'émission de la source. Grâce à cette mesure il est possible de déterminer l'efficacité lumineuse (voir § 3.1.1.2.3)

3.1.1.1 Lampes mesurées

3.1.1.1.1 Osram 150W

Tension [V]	Puissance active [W]	Flux à 1m [lux]	Puissance lumineuse [lumen]	Efficacité [lumen/W]	Température °C
170	95	78	613	6.45	138.4
180	104	98	770	7.41	140.5
190	112	118	927	8.28	143.7
200	123	147	1155	9.39	147.9
210	131	170	1336	10.20	153.3
220	141	200	1572	11.15	156.4
230	151	235	1847	12.23	161.7
240	161	270	2122	13.18	165.0

Tableau 3-1 Mesure lampe Osram 150W (1cm au dessus du culot)

3.1.1.1.2 Sunlux 100W

Tension [V]	Puissance active [W]	Flux à 1m [lux]	Puissance lumineuse [lumen]	Efficacité [lumen/W]	Température °C
170	64.7	49	613	8.02	127.8
180	70.7	60	770	8.99	134.2
190	76.7	73	927	10.08	139.5
200	83.0	88	1155	11.23	142.7
210	89.8	106	1336	12.50	146.9
220	96.1	121	1572	13.33	154.3
230	103.7	141	1847	14.40	158.6
240	110.2	167	2122	16.05	162.8

Tableau 3-2 Mesure lampe Sunlux 100W (1cm au dessus du culot)

3.1.1.1.3 Sunlux 60W

Tension [V]	Puissance active [W]	Flux à 1m [lux]	Puissance lumineuse [lumen]	Efficacité [lumen/W]	Température °C
170	37.95	22	613	5.50	108.7
180	41.4	28	770	6.42	115.1
190	44.9	35	927	7.40	120.4
200	48.7	42	1155	8.19	124.6
210	52.7	51	1336	9.19	126.8
220	56.4	60	1572	10.10	131.0
230	60.2	71	1847	11.20	135.2
240	64.2	82	2122	12.12	138.4

Tableau 3-3 Mesure lampe Sunlux 60W (1cm au dessus du culot)

3.1.1.1.4 Sunlux économique 20W

Tension [V]	Puissance active [W] (cos(φ))	Flux à 1m [lux]	Puissance lumineuse [lumen]	Efficacité [lumen/W]	Température °C
170	13.38 (0.657)	87	613	61.80	80.7
180	14.27 (0.648)	93	770	61.94	82.5
190	15.10 (0.643)	101	927	63.57	84.7
200	15.88 (0.635)	108	1155	64.64	86.4
210	16.59 (0.628)	113	1336	64.73	89.5
220	17.80 (0.625)	120	1572	64.07	91.7
230	18.40 (0.628)	125	1847	64.57	95.7
240	19.35 (0.612)	130	2122	63.85	102.7

Tableau 3-4 Mesure Lampe Sunlux économique 20W (2cm au haut de la lampe)

3.1.1.2 Comparaison

3.1.1.2.1 Puissance électrique active en fonction de la tension

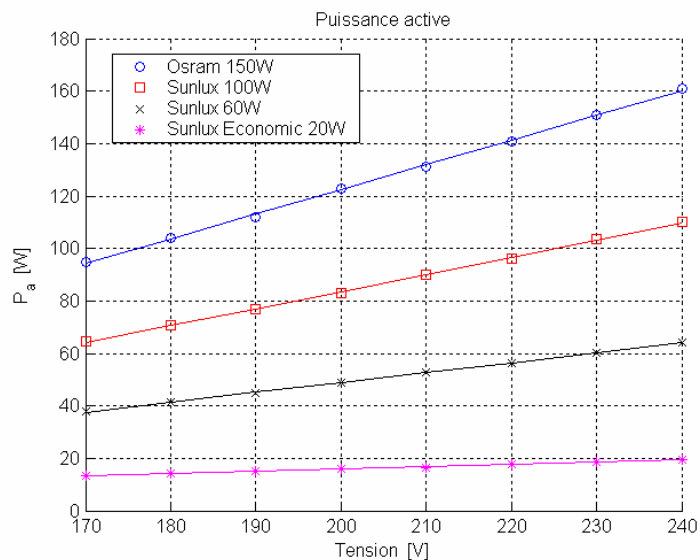


Figure 3-1 : Puissance active en fonction de la tension

3.1.1.2.2 Flux lumineux

La Figure 3-2 montre que le flux lumineux est directement proportionnel à la tension d'alimentation.

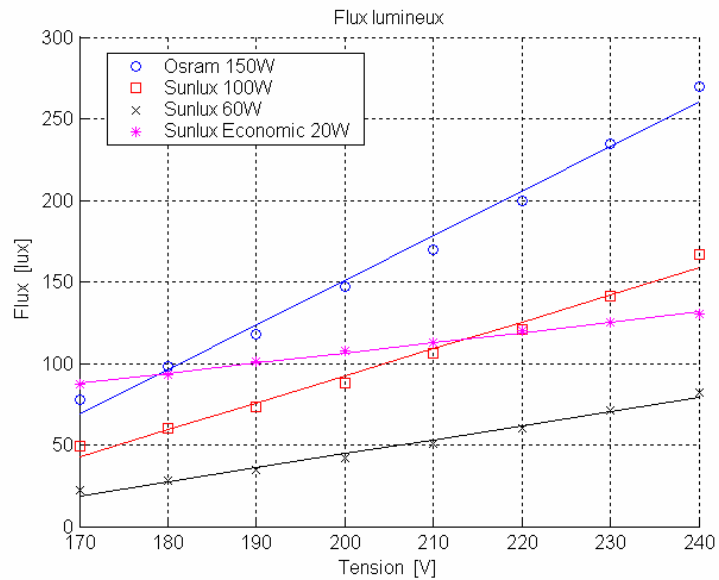


Figure 3-2 : Flux lumineux en fonction de la tension

La Figure 3-3 montre que le flux lumineux est quasi proportionnel à la puissance active consommée.

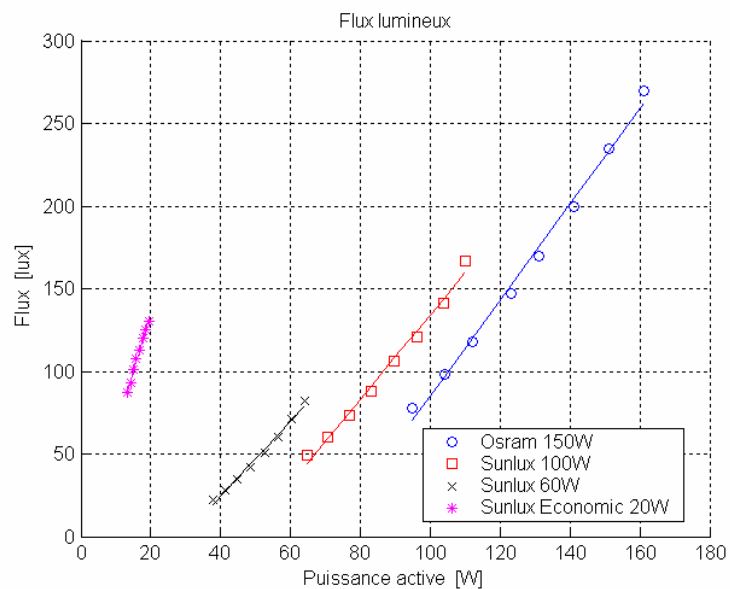


Figure 3-3 : Flux lumineux en fonction de la puissance électrique active

3.1.1.2.3 Efficacité lumineuse en fonction de la tension

L'efficacité lumineuse est liée au rendement de la source lumineuse par la relation

$$\eta = \frac{1}{683} \frac{P_L}{P_a} = \frac{1}{683} \beta \quad 3.1$$

avec

- P_a : puissance électrique active [W]
 P_L : puissance lumineuse [lumen]
 Unité : 1 W \rightarrow 683 lumen

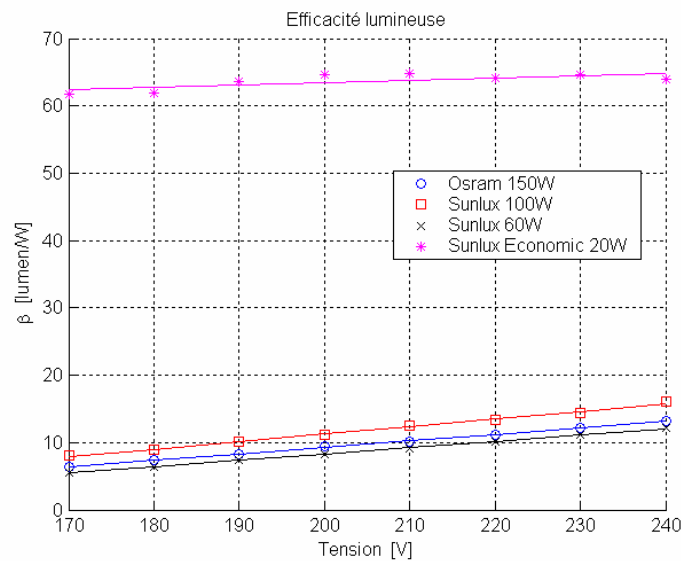


Figure 3-4 : Efficacité lumineuse en fonction de la tension

Comme on pouvait s'y attendre, c'est la lampe économique (Sunlux Economic 20W) qui présente la plus grande efficacité lumineuse.

En partant du principe que la forme de la polaire d'émission lumineuse d'une lampe ne change pas avec la puissance électrique, la dépendance du ratio entre le flux lumineux et la puissance active est identique à un facteur constant près à l'efficacité lumineuse, ceci bien entendu en mesurant le flux lumineux toujours au même endroit.

3.1.1.3 Cartographie thermique

La température de la source lumineuse est définie par la moyenne de 4 points de mesure (curseur) situé, dans le cas présent à 1 ou 2 cm du culot de la lampe. Il faut être très prudent sur l'interprétation de ces mesures. En effet le coefficient d'émissivité ϵ de ce type de sources n'est pas connu. Nous l'avons fixé arbitrairement à 0.5. Il est possible néanmoins de faire des comparaisons entre divers points de fonctionnement. L'intérêt principal de cette mesure est dicté par la modification sensible de la durée de vie des lampes en fonction de la température d'utilisation. Selon la réf. [5] (OSRAM, Journée Technique CSEEE 2003), pour les lampes halogènes et à incandescence, la durée de vie diminue de 40% pour une augmentation de la tension de 5%.

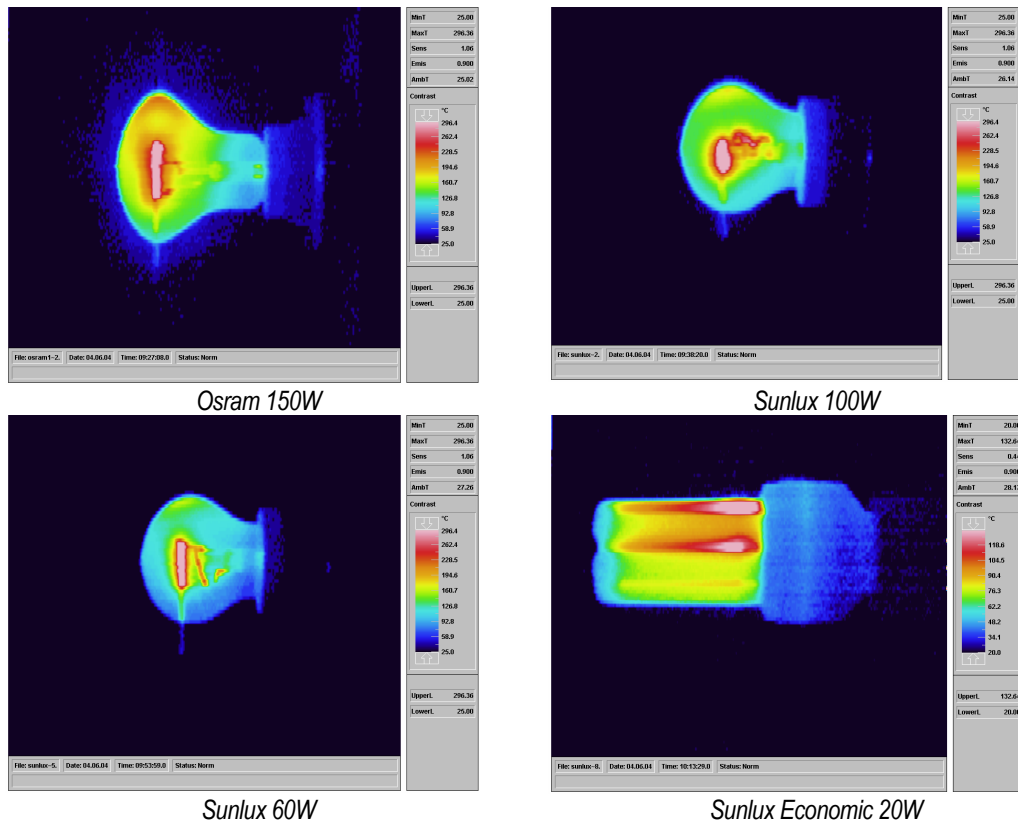


Figure 3-5 : Cartographie à 230V

3.1.2 Lampes haute pression à vapeur de mercure

3.1.2.1 Lampe - ballasts mesurés

3.1.2.1.1 Osram HQL 80W - Ballast ferromagnétique

Tension [V]	Puissance active [W]	Flux à 1m [lux]	cos(φ) [1]	Température [°C]
200	73.4	285	0.829	227
210	82.3	325	0.865	235
220	90.11	375	0.879	242
230	98.1	415	0.896	246
240	107.2	450	0.907	249

Tableau 3-5 Mesure lampe Osram HQL 80W - Ballast ferromagnétique

3.1.2.1.2 Osram HQL 80W - Ballast électronique

Tension [V]	Puissance active [W]	Flux à 1m [lux]	cos(φ) [1]	Température [°C]
200	65.0	260	0.546	221
210	73.2	305	0.554	232
220	80.6	345	0.536	238
230	89.6	385	0.517	244
240	98.1	430	0.499	248

Tableau 3-6 Mesure lampe Osram HQL 80W – Ballast électronique

3.1.2.2 Comparaison

3.1.2.2.1 Puissance électrique active en fonction de la tension

La Figure 3-6 montre clairement que le ballast électronique permet de diminuer la puissance active. Il faut toutefois voir que le $\cos(\varphi)$ est au environ de 0.525 en comparaison de 0.85 pour le ballast ferromagnétique.

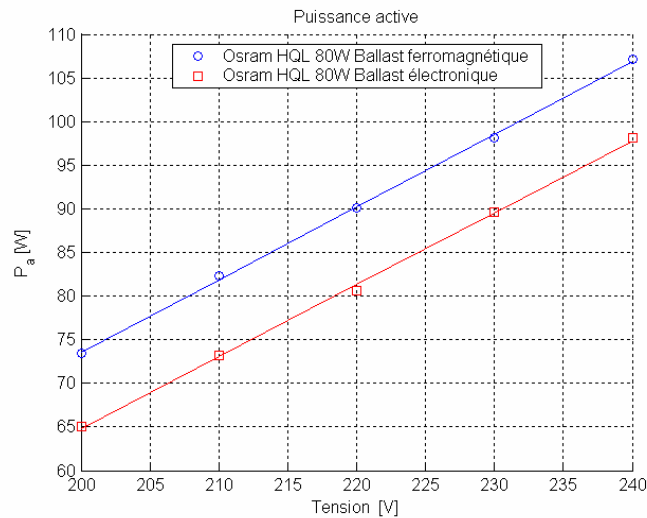


Figure 3-6 : Puissance active en fonction de la tension

Il est également intéressant de constater qu'avec le ballast ferromagnétique la puissance nominale de 80W correspond à une tension de 207V contre 218V pour un ballast électronique

3.1.2.2.2 Flux lumineux

La Figure 3-7 montre que le flux lumineux est augmenté en utilisant un ballast ferromagnétique, ce qui semble évident puisque la puissance active est aussi plus grande

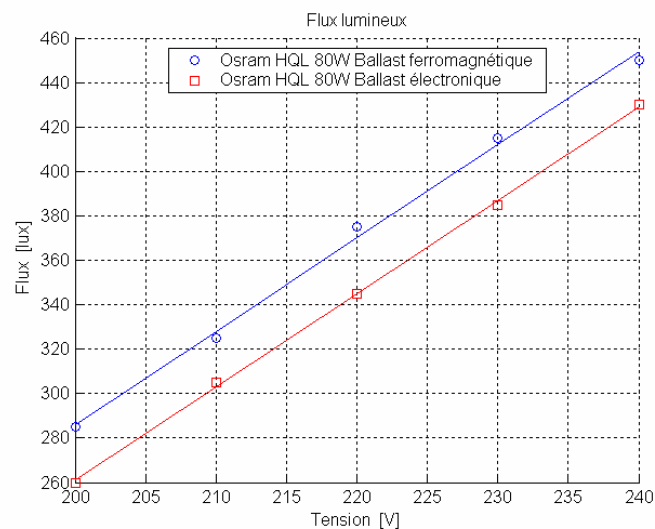


Figure 3-7 : Flux lumineux en fonction de la tension

La Figure 3-8 montre que par extension, efficacité lumineuse est plus grande lors de l'utilisation d'un ballast électronique.

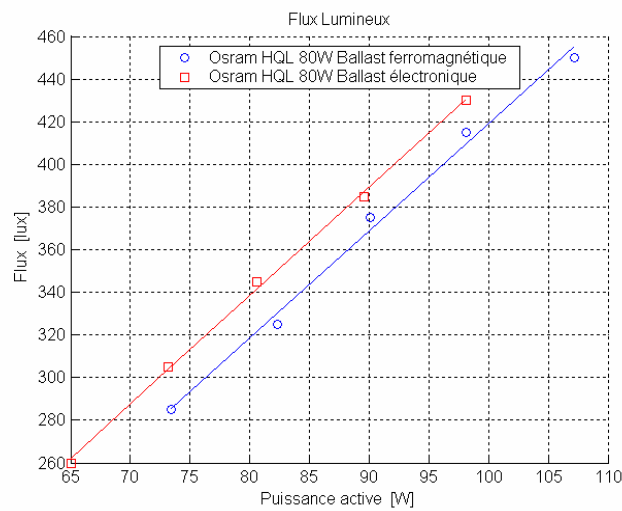


Figure 3-8 : Flux lumineux en fonction de la puissance active consommée

3.1.2.3 Cartographie thermique

Les mêmes remarques qu'au § 3.1.1.3 peuvent être faites ici.

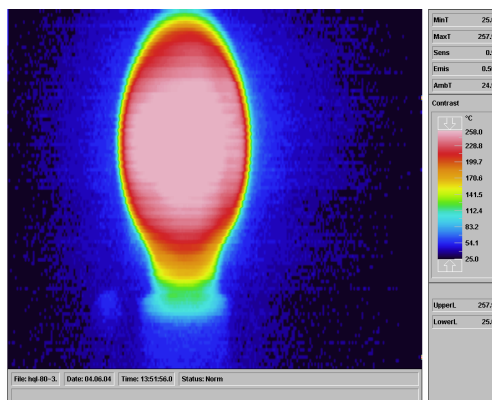


Figure 3-9 : Cartographie thermique Osram HQL 80W à 230V

3.1.3 Lampes haute pression à vapeur de sodium

3.1.3.1 Lampes – Ballasts mesurés

3.1.3.1.1 Osram 110W NAV-E – Ballast ferromagnétique

Tension [V]	Puissance active [W]	Flux à 1m [lux]	cos(φ) [1]	Température [°C]
200	100.8	470	0.813	186
210	109.0	535	0.800	189
220	122.6	640	0.805	193
230	136.2	740	0.806	199
240	148.2	815	0.787	202

Tableau 3-7 : Mesure lampe Osram 110W NAV-E – Ballast ferromagnétique

3.1.3.1.2 Osram NAV-T 100W - Ballast électronique

Tension [V]	Puissance active [W]	Flux à 1m [lux]	cos(φ) [1]	Température [°C]
200	94.6	760	0.885	235
210	104.4	860	0.900	240
220	114	960	0.890	244
230	115.6	960	0.865	244
240	117.15	960	0.829	244

Tableau 3-8 Mesure lampe Osram NAV-T 100W - Ballast électronique

3.1.3.2 Comparaison

3.1.3.2.1 Puissance électrique active en fonction de la tension

La Figure 3-10 montre que la puissance nominale des sources lumineuses est atteinte à :

1. U=209V pour la lampe Osram 110W NAV-E avec un ballast ferromagnétique.
2. U=205V pour la lampe Osram 100W NAV-T avec un ballast électronique.

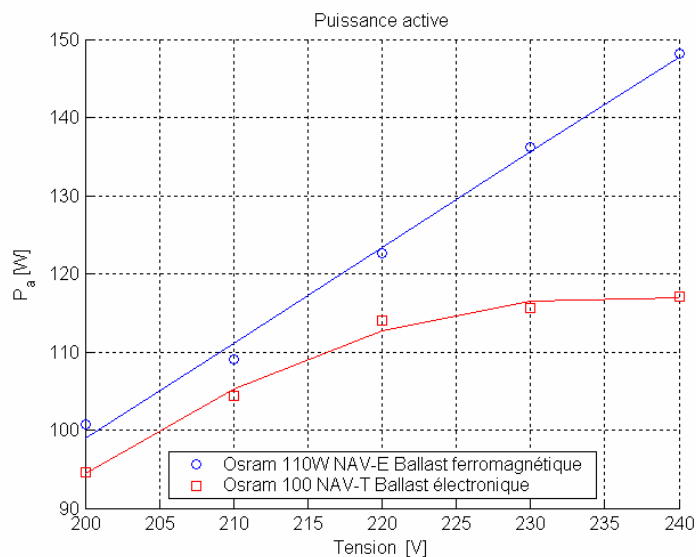


Figure 3-10 : Puissance active en fonction de la tension

3.1.3.2.2 Flux lumineux

Comme attendu, le flux lumineux de la source la plus puissante est le plus grand. Il est intéressant de constater que, à partir de la Figure 3-12, par extension, l'efficacité lumineuse de la lampe U=205V pour la lampe Osram 100W NAV-T avec un ballast électronique est très supérieure.

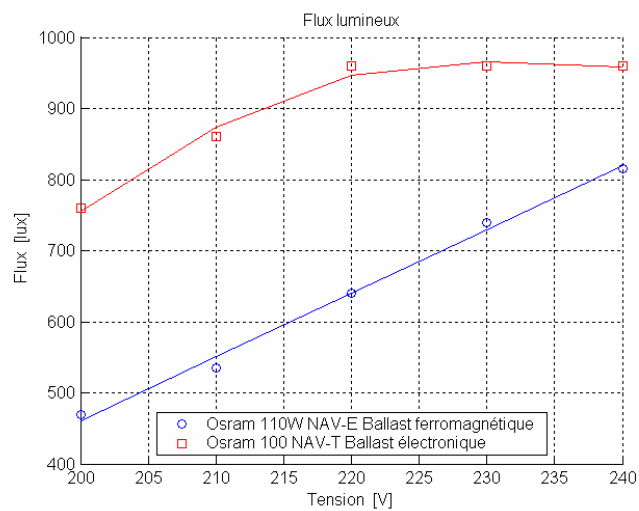


Figure 3-11 : Flux lumineux en fonction de la tension

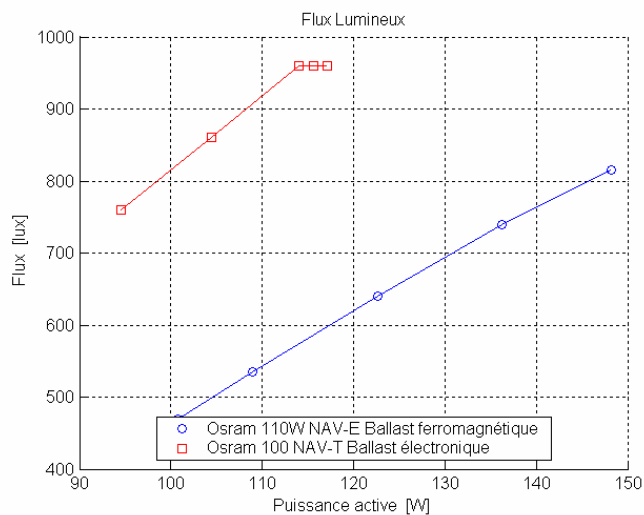


Figure 3-12 : Flux lumineux en fonction de la puissance active

3.1.3.3 Cartographie thermique

Les mêmes remarques qu'au § 3.1.1.3 peuvent être faites ici.

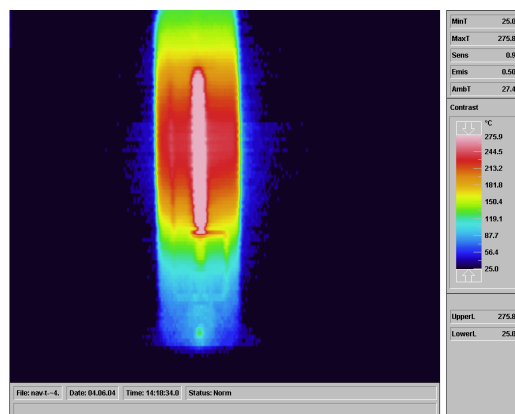


Figure 3-13 : Cartographie thermique – lampe Osram NAV-T 100W - Ballast électronique à 230V

3.1.4 Lampe aux halogénures métalliques

3.1.4.1 Lampe – Ballast mesuré

3.1.4.1.1 Lampe Osram Powerstar HQI-T 250W/D (ballast ferromagnétique)

Tension [V]	Puissance [W]	Flux à 1m [lux]	cos(φ) [1]
200			
210	199.5	1050	0.809
220	221.5	1250	0.804
230	244.4	1490	0.800
240	274	1660	0.793

Tableau 3-9 : Lampe Osram Powerstar HQI 250W/D

Pour cette lampe, le fabricant indique une tolérance de 5% sur la tension, raison pour laquelle aucune mesure n'a été effectuée à 200V.

On peut admettre que le $\cos(\varphi)$ est constante dans la plage d'utilisation

3.1.4.2 Puissance électrique active en fonction de la tension

La Figure 3-14 montre que la puissance active nominale du tube fluorescent est atteinte pour la tension nominale.

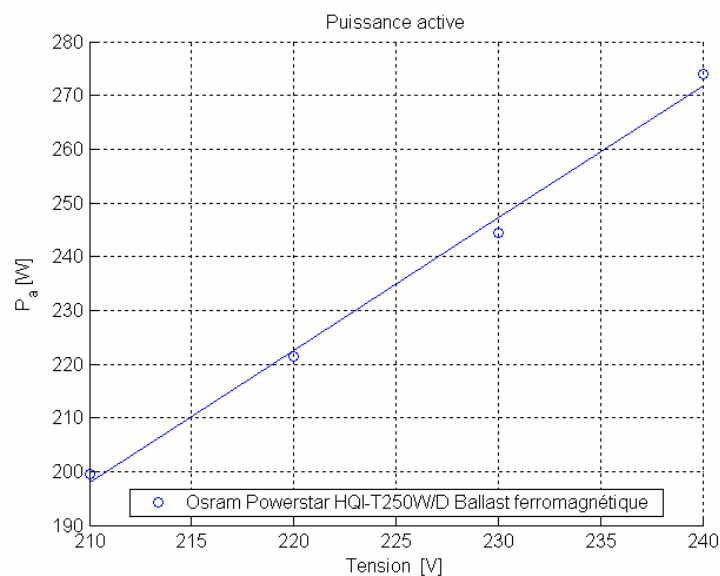


Figure 3-14 : Puissance active en fonction de la tension

3.1.4.3 Flux lumineux

Les Figure 3-15 et Figure 3-16 montrent le flux lumineux est directement proportionnel à la tension ou encore à la puissance active consommée.

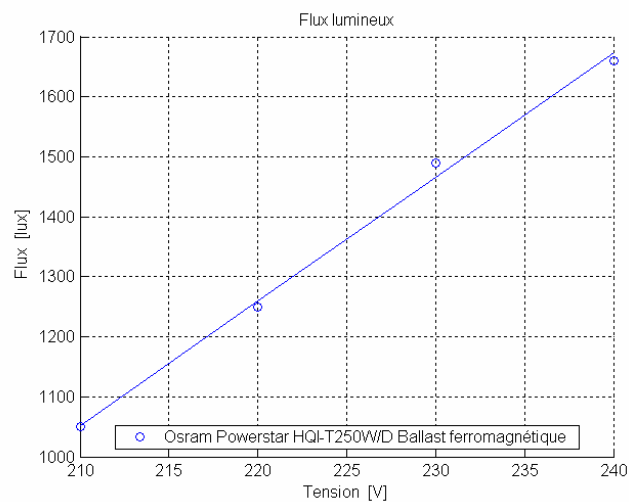


Figure 3-15 : Flux lumineux en fonction de la tension

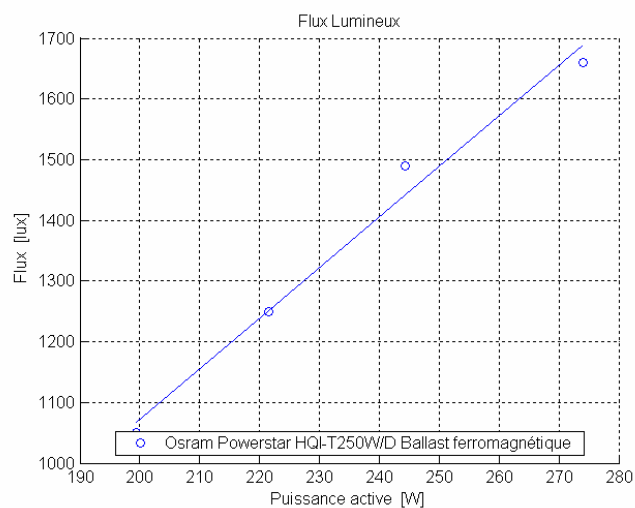


Figure 3-16 : Flux lumineux en fonction de la puissance

3.1.5 Lampe fluorescente

3.1.5.1 Lampe mesurée

3.1.5.1.1 Tube fluorescent Philips TLD 38W / 33 (ballast ferromagnétique)

Tension [V]	Puissance [W]	Flux à 1m [lux]	cos(φ) [1]
170	27.60	189	0.649
180	33.60	220	0.610
190	39.10	245	0.572
200	44.00	270	0.540
210	48.40	285	0.510
220	52.90	305	0.483
230	57.70	325	0.468
240	61.90	330	0.445

Tableau 3-10 : Tube Fluorescent Philips TLD 38W / 33

Le Tableau 3-10 montre que le $\cos(\varphi)$ descend lorsque la tension augmente. On est donc tenté de dire qu'il est judicieux de travailler à des tensions aussi faibles que possible.

3.1.5.2 Puissance électrique active en fonction de la tension

La Figure 3-17 montre que la puissance active nominale du tube fluorescent est atteinte pour une tension inférieure à 200V.

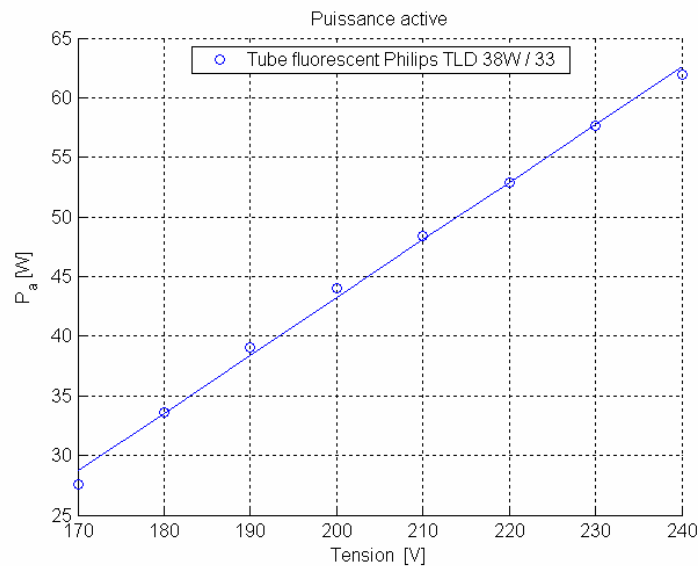


Figure 3-17 : Puissance active en fonction de la tension

3.1.5.3 Flux lumineux

Les Figure 3-18 et Figure 3-19 montrent qu'il n'y a pas d'optimum du flux lumineux lorsque la tension varie dans les limites d'utilisation de la source.

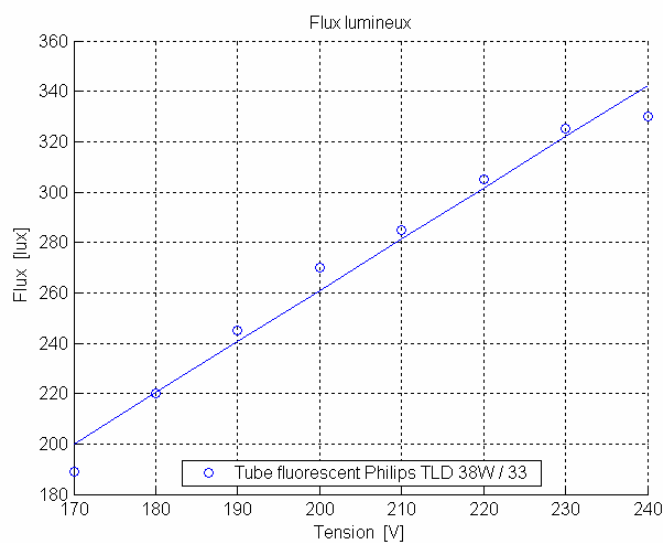


Figure 3-18 : Flux lumineux en fonction de la tension

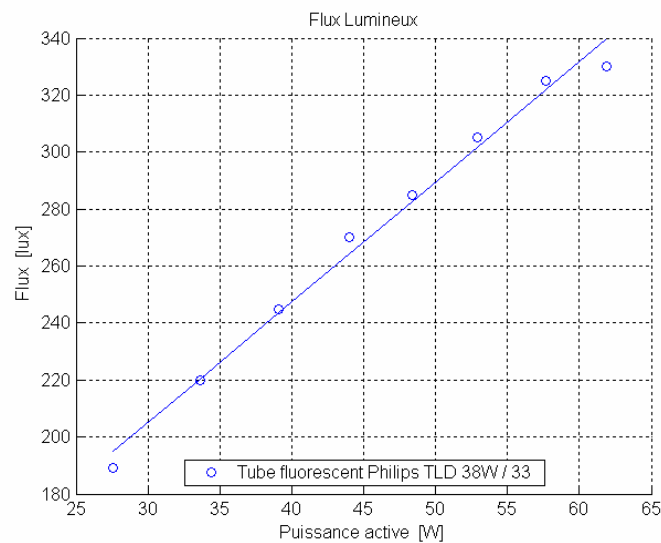


Figure 3-19 : Flux lumineux en fonction de la puissance

3.1.5.4 Mesure de la température en fonction de la position du tube fluorescent

Les mesures suivantes montrent que la position du tube fluorescent influence la température de fonctionnement. L'écart de température du tube est de 9°C à 230V, soit environ 5%.

Tension [V]	Température		Tension [V]	Température	
	Tube [°C]	Starter [°C]		Tube [°C]	Starter [°C]
200	164	35	200	168	44
210	172	40	210	176	44
220	177	41	220	181	44
230	179	40	230	188	44
240	185	42	240	193	44

Position normale Position verticale

Tableau 3-10 : Tube fluorescent Philips TLD 38W / 33 : Température

3.2 ECONOMIE ATTENDUE POUR LES DIVERSES SOURCES MESURÉES

Les Tableau 3-11 et 3-12 montrent les économies attendues pour chaque type de source lumineuse mesuré en fonction de la tension d'utilisation. Le tableau 3-11 correspond aux possibilités du LEC-25 que nous avons testé et le tableau 3-12 au LEC-A. Les valeurs obtenues doivent encore être corrigées par le rendement de l'économiseur d'énergie. On peut déjà observer que les lampes à incandescences ne sont pas celles pour lesquelles l'économie est la plus grande. Les lampes haute pression à vapeur de mercure, au sodium ou aux halogénures métalliques présentent un facteur d'économie théorique jusqu'à 30% dans le meilleur des cas. Cependant, il faut relativiser ce résultat, car pour ces lampes les fabricants indiquent une tolérance moins grande (5%) quant à la tension d'alimentation.

Exception faite des sources lumineuses à incandescence, une réduction de la **tension d'alimentation à 207V_{AC}** permet une **économie de 12% à 22% pour 230V** au réseau ou **15% à 30% pour 240V**. Il faut toutefois être prudent, le choix d'un ballast ferromagnétique ou électronique influence l'efficacité lumineuse. De plus le $\cos(\varphi)$ reste un paramètre important.

Type	Marque	230 V		207 V		γ [%]
		Puissance [W]	cos ϕ	Puissance [W]	cos ϕ	
Ampoule à incandescence	Osram 150 W	151.0	1.000	128.6	1.000	14.8
	Osram Sunlux 100W	103.7	1.000	87.8	1.000	15.3
	Osram Sunlux 60W	60.2	1.000	51.5	1.000	14.5
	Osram Sunlux Economique 20W	18.4	0.618	16.4	0.630	11.0
Vapeur de mercure HP	OSRAM HQL 80W + ballast ferromagnétique	98.1	0.896	79.6	0.854	18.8
	OSRAM HQL 125W + ballast ferromagnétique	150.5	0.894	119.7	0.927	20.5
	OSRAM HQL 80W + ballast électronique	89.6	0.517	70.7	0.552	21.1
Sodium HP	Osram 110W NAV-E + ballast ferromagnétique	136.2	0.806	106.5	0.809	21.8
	Osram NAV-T 100W + ballast électronique	115.6	0.865	101.5	0.896	12.2
Halogénures métalliques	Osram Powerstar HQL-T 250W/D + bal. ferromag.	244.4	0.800	193.0	0.808	21.0
Tube fluorescent	Phillips TLD 38W / 33 + ballast ferromagnétique	57.7	0.468	47.1	0.519	18.4

Tableau 3-11 : Economie attendue pour les diverses sources mesurées (Sans tenir compte des pertes dans l'économiseur), tension réseau : 230V.

Type	Marque	240 V		205 V		γ [%]
		Puissance [W]	cos ϕ	Puissance [W]	cos ϕ	
Ampoule à incandescence	Osram 150 W	161.0	1.000	127.0	1.000	21.1
	Osram Sunlux 100W	110.2	1.000	86.4	1.000	21.6
	Osram Sunlux 60W	64.2	1.000	50.7	1.000	21.0
	Osram Sunlux Economique 20W	19.4	0.618	16.2	0.630	16.1
Vapeur de mercure HP	OSRAM HQL 80W + ballast ferromagnétique	107.2	0.907	77.8	0.847	27.4
	OSRAM HQL 125W + ballast ferromagnétique	164.4	0.880	117.0	0.928	28.8
	OSRAM HQL 80W + ballast électronique	98.1	0.430	69.1	0.550	29.6
Sodium HP	Osram 110W NAV-E + ballast ferromagnétique	148.2	0.787	104.9	0.806	29.2
	Osram NAV-T 100W + ballast électronique	117.2	0.829	99.5	0.893	15.1
Halogénures métalliques	Osram Powerstar HQL-T 250W/D + bal. ferromag.	244.4	0.800	193.0	0.808	21.0
Tube fluorescent	Phillips TLD 38W / 33 + ballast ferromagnétique	61.9	0.445	46.2	0.525	25.4

Tableau 3-12 : Economie attendue pour les diverses sources mesurées (Sans tenir compte des pertes dans l'économiseur), tension réseau : 240V.

3.3 MESURE DU LEC-25 MONOPHASÉ 10A SUR LAMPES À INCANDESCENCE

3.3.1 Mesure des performances

Les grandeurs suivantes ont été mesurées à l'entrée et à la sortie de l'appareil [3].

1. Courant RMS
2. Tension RMS
3. Puissance active
4. Facteur de puissance $\cos(\varphi)$

Pour comparaison ces grandeurs sont également mesurées sans économiseur (ou avec économiseur en position « bypass »).

La tension d'entrée a été fixée entre 200V et 240V avec une résolution de 10V.

La charge ohmique, constituée de lampes à incandescences de 60W et 100W ($\cos(\varphi)=1$) permet une variation du courant selon les incréments suivants : 10%, 20%, 50%, 90%, 100 % du courant maximal. Le choix de lampes à incandescences est dicté par des raisons de charge à disposition au laboratoire.

Le LEC-25 a été programmé pour une tension de sortie de 207V.

Les résultats sont reportés dans le Tableau 3-14. L'économie la plus grande est atteinte lorsque l'économiseur travaille près du courant maximal de 10A (le LEC-25 présente un rendement maximum à puissance nominale). Dans le cas où la tension d'entrée est de 230V et celle de sortie de 207V, l'économie mesurée est de 13.9%, soit inférieur de 1 % à l'économie calculée d'après le modèle de la section 1.2 (Tableau 1-2). La différence s'explique par les pertes dans l'économiseur qui sont de l'ordre de 35W.

La Figure 3-20 montre que pour une puissance égale ou supérieure à la moitié de la puissance nominale, le $\cos(\varphi)$ à l'entrée du LEC-25 est supérieure à 0.95

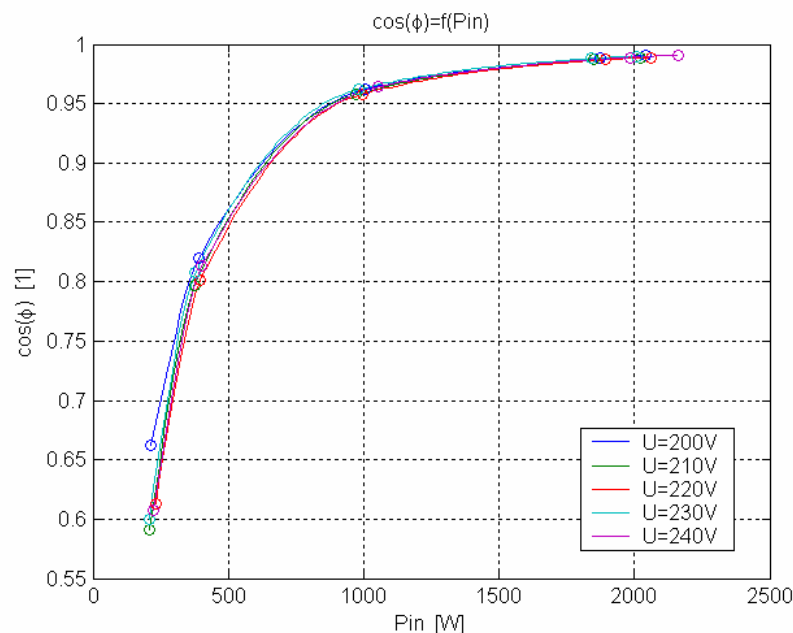


Figure 3-20 : $\cos(\varphi)$ en fonction de la puissance active d'entrée

La Figure 3-21 montre que le rendement est supérieur à 95% lorsque la puissance active d'entrée est supérieure à la moitié de la puissance nominale. De plus on obtient le rendement le plus élevé, quelque soit la puissance d'entrée lorsque la tension est à 230V. Cette valeur est donc optimale puisqu'elle correspond à la valeur nominale du réseau d'alimentation.

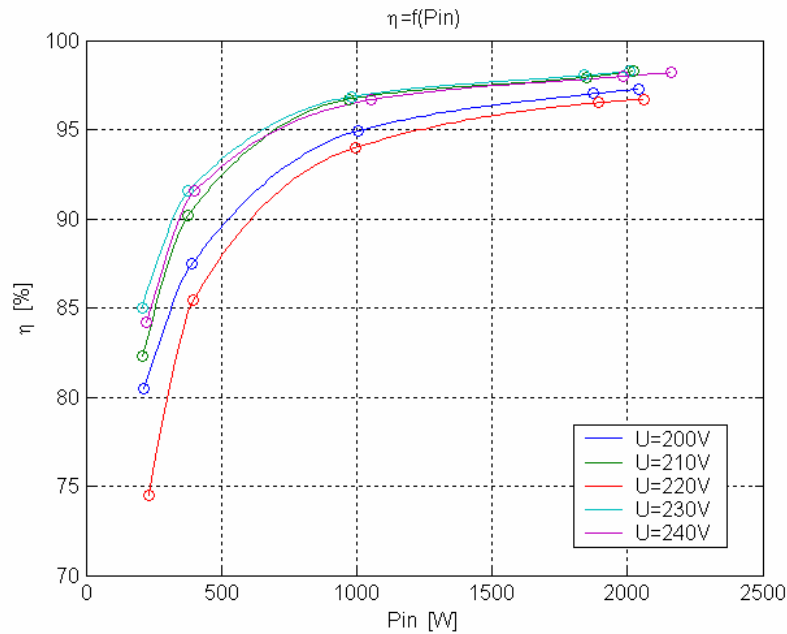


Figure 3-21 : Rendement en fonction de la puissance active d'entrée

3.3.1.1 Comparaison entre grandeurs théoriques et grandeurs mesurées

Cette comparaison se base sur les Tableau 1-2 et Tableau 3-14

Tension	200	210	220	230	240	[V]
Economie théorique	-5.5	2.2	9.0	14.9	20.3	[%]
Economie mesurée	-8.4	0.2	5.7	13.9	- ⁽¹⁾	[%]

Tableau 3-13 : Economie théorique et mesure à >90% de la puissance nominale

⁽¹⁾ : Le LEC-25 utilisé ne permet pas un abaissement de la tension supérieur à 23V.

Pourcent [%]	Charge		Entrée			Sortie			Bypass Pact [W]	Economie [%]		
	Ampoules 100W		Courant [A]	Tension [V]	Pact. [W]	cosφ [1]	Courant [A]	Tension [V]			Pact. [W]	cosφ [1]
10	2		1.74	200.0	215	0.622	0.84	206.3	173	1.000	165	-30.3
20	4		2.38	200.0	392	0.820	1.66	206.5	343	1.000	326	-20.2
50	11		5.21	200.0	1005	0.962	4.60	207.4	954	1.000	902	-11.4
90	21		9.48	200.0	1876	0.988	8.80	206.8	1820	1.000	1724	-8.8
100	23		10.33	199.7	2042	0.991	9.62	206.2	1986	1.000	1884	-8.4
10	2		1.68	210.0	209	0.591	0.83	205.7	172	1.000	177	-17.8
20	4		2.25	209.6	376	0.797	1.65	205.0	339	1.000	351	-7.1
50	11		4.86	210.0	979	0.958	4.60	207.0	952	1.000	973	-0.6
90	21		8.91	210.0	1850	0.987	8.79	206.8	1819	1.000	1854	0.2
100	23		9.72	210.0	2021	0.989	9.63	206.3	1986	1.000	2025	0.2
10	2		1.71	220.5	231	0.613	0.84	205.5	172	1.000	190	-21.6
20	4		2.26	220.0	398	0.801	1.65	205.3	340	1.000	377	-5.7
50	11		4.76	219.0	997	0.958	4.57	205.0	937	1.000	1043	4.4
90	21		8.72	220.0	1892	0.987	8.81	207.0	1826	1.000	1999	5.4
100	23		9.47	220.1	2062	0.989	9.64	206.9	1994	1.000	2186	5.7
10	2		1.50	231.0	207	0.600	0.84	208.6	176	1.000	203	-2.0
20	4		2.03	230.8	379	0.808	1.07	208.2	347	1.000	403	5.9
50	11		4.44	230.0	982	0.962	4.60	207.0	951	1.000	1113	11.8
90	21		8.10	228.9	1841	0.988	8.78	205.8	1805	1.000	2138	13.9
100	23		8.87	228.9	2010	0.990	9.61	205.6	1975	1.000	2335	13.9
10	2		1.52	240.0	221	0.607	0.86	216.5	186	1.000	218	-1.6
20	4		2.00	240.0	403	0.813	1.70	216.6	369	1.000	431	6.4
50	11		4.35	240.0	1053	0.964	4.71	216.3	1018	1.000	1190	11.5
90	21		8.34	240.0	1983	0.989	9.00	216.0	1943	1.000	2275	12.8
100	23		9.10	240.0	2164	0.991	9.86	215.7	2125	1.000	2489	13.1

Tableau 3-14 : Performances de l'économiseur LEC-25 monophasé

3.3.2 Contrôle de l'affichage

Cette section a pour but le contrôle de l'affichage du LEC 25 par rapport à l'analyseur **Norma D4355**. Les grandeurs suivantes peuvent être affichées sur le LEC.

1. Tension entrée.
2. Courant entrée.
3. Puissance active entrée.
4. $\cos(\varphi)$ d'entrée.

Les résultats de la comparaison sont visibles dans le tableau ci-dessous.

- La tension affichée est inférieure de 1.3% à celle appliquée.
- Le courant affiché est correct au-dessus de 2 A, mais arrondi à l'ampère.
- La puissance affichée est correcte mais arrondie au kilowatt.
- Le $\cos(\varphi)$ affiché n'est correct que pour des valeurs proches de 1.

Tension entrée		Courant entrée		Puissance active entrée		cos φ entrée	
Appliquée	Indiquée	Appliqué	Indiqué	Appliquée	Indiquée	Appliqué	Indiqué
[V]	[V]	[A]	[A]	[kW]	[kW]	[1]	[1]
230.2	227	1.491	000	0.2064	00.0	0.596	.00
230.2	227	2.083	000	0.3715	00.0	0.809	.00
230.0	227	2.349	002	0.4652	00.0	0.861	.80
230.2	227	5.174	005	1.140	01.0	0.963	.93
230.0	227	8.880	009	2.023	02.0	0.990	.99

Tableau 3-15 : Comparaison entre grandeurs appliquées et indiquées par le LEC-25

En résumé, on ne peut pas se baser sur les grandeurs affichées pour des mesures précises, mais l'affichage donne des indications acceptables lorsque le LEC travaille au voisinage de sa puissance maximale.

3.4 MESURE DU LEC-A TRIPHASÉ 3 x 30A SUR LAMPES À INCANDESCENCE

3.4.1 Mesure des performances

Les grandeurs suivantes ont été mesurées à l'entrée et à la sortie de l'appareil [4].

1. Courant RMS (moyenne des 3 phases).
2. Tension RMS (moyenne des 3 phases).
3. Puissance active (somme des 3 phases).
4. Facteur de puissance $\cos(\varphi)$ (moyenne des 3 phases).

Pour comparaison ces grandeurs sont également mesurées sans économiseur (ou avec économiseur en position « bypass »).

La tension d'entrée a été fixée entre 200V et 240V avec une résolution de 10V.

La charge ohmique, constituée de lampes à incandescences de 60W et 100W ($\cos(\varphi)=1$) permet une variation des courants selon les incréments suivants : 10%, 20%, 50%, 85% du courant maximal (limitation de la puissance en fonction de la charge disponible). Le choix de lampes à incandescences est dicté par des raisons de charge à disposition au laboratoire.

Le LEC-A est programmé pour donner 205V à la sortie.

Les résultats sont reportés dans le Tableau 3-17. L'économie la plus grande est atteinte lorsque l'économiseur travaille près du courant maximal de 3x30A (le LEC-A présente un rendement maximum à puissance nominale). Dans le cas où la tension d'entrée est de 230V et celle de sortie de 205V, l'économie mesurée est de 14.5%, soit inférieure de 1.7% à l'économie calculée d'après le modèle de la section 1.2 (Tableau 1-3). La différence s'explique par les pertes dans l'économiseur qui sont de l'ordre de 250W à pleine charge.

La Figure 3-22 montre que pour de faibles puissances déjà, le $\cos(\varphi)$ à l'entrée du LEC-A est égal à 1.

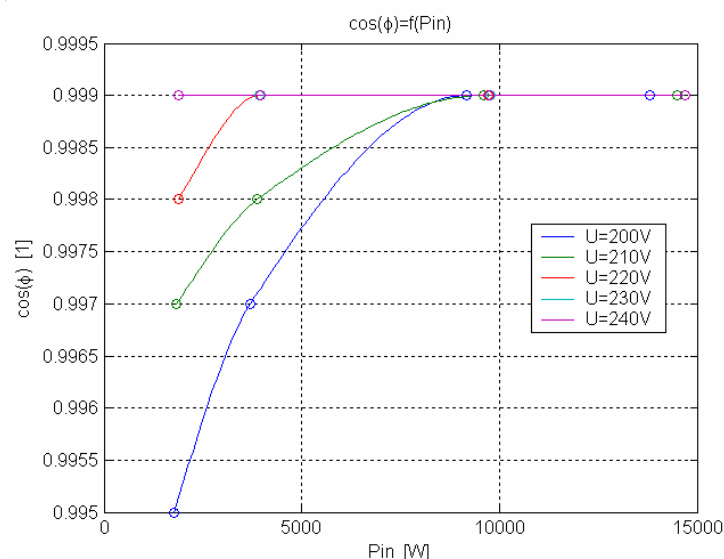


Figure 3-22 : $\cos(\varphi)$ en fonction de la puissance active d'entrée

La Figure 3-23 montre que le rendement est supérieur à 96% lorsque la puissance active d'entrée est supérieure à 10% de la puissance nominale. De plus pour une tension d'entrée de 230V, le rendement est constant sur la plage de 25% à 85% de la puissance nominale (valeur maximum mesurée)

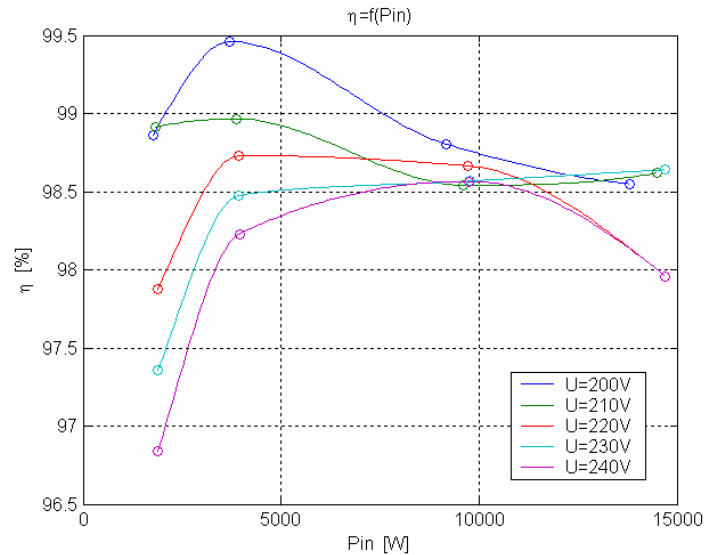


Figure 3-23 : Rendement en fonction de la puissance active d'entrée

3.4.1.1 Comparaison entre grandeurs théoriques et grandeurs mesurées

Cette comparaison se base sur les Tableau 1-3 et Tableau 3-17

Tension	200	210	220	230	240	[V]
Economie théorique	-3.9	3.7	10.3	16.2	21.5	[%]
Economie mesurée	0.7	3.3	8.7	14.5	20.1	[%]

Tableau 3-16 : Economie théorique et mesure à 85% de la puissance nominale

Pourcent [%]	Charge Ampoules		Entrée			Sortie			Bypass Pact [W]	Economie [%]		
	100W	60W	Courant [A]	Tension [V]	Pact [W]	cosφ [1]	Courant [A]	Tension [V]			Pact [W]	cosφ [1]
10	7	0	2.92	200	1760	0.995	2.90	200	1740	0.999	1750	-0.6%
20	15	0	6.15	200	3700	0.997	6.14	199	3680	0.999	3720	0.5%
50	24	23	15.20	200	9180	0.999	15.20	197	9070	0.999	9530	3.7%
85	35	35	23.00	200	13800	0.999	23.10	196	13600	0.999	13900	0.7%
10	7	0	2.92	210	1840	0.997	2.95	205	1820	0.999	1880	2.1%
20	15	0	6.14	210	3870	0.998	6.23	205	3830	0.999	3980	2.8%
50	24	23	15.20	210	9600	0.999	15.50	203	9460	0.999	10000	4.0%
85	35	35	23.00	210	14500	0.999	23.50	203	14300	0.999	15000	3.3%
10	7	0	2.84	220	1880	0.998	2.96	207	1840	0.999	2020	6.9%
20	15	0	5.94	220	3940	0.999	6.26	207	3890	0.999	4270	7.7%
50	24	23	14.70	220	9730	0.999	15.60	205	9600	0.999	10800	9.9%
85	35	35	22.20	220	14700	0.999	23.50	204	14400	0.999	16100	8.7%
10	7	0	2.75	230	1890	0.999	2.96	207	1840	0.999	2160	12.5%
20	15	0	5.71	230	3940	0.999	6.26	207	3880	0.999	4580	14.0%
50	24	23	14.10	230	9770	0.999	15.60	205	9630	0.999	11500	15.0%
85	35	35	21.30	230	14700	0.999	23.60	204	14500	0.999	17200	14.5%
10	7	0	2.68	240	1900	0.999	2.96	207	1840	0.999	2310	17.7%
20	15	0	5.50	240	3950	0.999	6.26	206	3880	0.999	4900	19.4%
50	24	23	13.50	240	9760	0.999	15.60	205	9620	0.999	12300	20.7%
85	35	35	20.40	240	14700	0.999	23.50	204	14400	0.999	18400	20.1%

Tableau 3-17 : Performances de l'économiseur LEC-A 3x30A triphasé

4. CONCLUSIONS

Sous ses aspects très simples, l'éclairage est une technique assez complexe en raison des nombreux paramètres intervenant pour son optimisation. Les conclusions de ce rapport sont basées uniquement sur des observations et des mesures faites lors des tests des sources et des économiseurs à disposition.

Le paramètre de base sur lequel dépend le comportement d'un éclairage est la tension d'alimentation. A ce jour la valeur nominale de cette tension est de 230V_{AC}. Une élévation de cette tension, provoque une augmentation de la consommation d'énergie. L'asservissement de cette tension à un niveau correspondant au point de fonctionnement à puissance nominale des sources lumineuses (205V_{AC}) permet une économie substantielle de la consommation, encore faut-il le faire avec des pertes minimales.

Le paramètre observable est la luminosité. Ce paramètre, subjectif pour l'utilisateur, est certainement le plus important puisqu'il touche directement le confort. Selon les observations faites durant les tests, il serait faux de dire que la diminution de luminosité n'est pas visible pour une source lumineuse quelconque alimentée à 240V ou 205V. Par contre, une diminution progressive de la tension (5V/min) n'est pas perceptible. Le confort est donc garanti si la diminution de tension est contrôlée dans le temps.

Fort de la constatation précédente sur le confort de l'utilisateur, la diminution de la tension de service apporte plusieurs économies intéressantes.

1. *Economie d'énergie.*

La théorie, consolidée par diverses mesures montre qu'une économie d'énergie électrique allant de 10% à 30% est possible. ***Pour une réduction maximale de la consommation électrique, il faut faire une optimisation des sources lumineuses et des ballasts.*** Cette économie a un impact sur notre environnement.

2. *Augmentation de la durée de vie des lampes*

Selon plusieurs sources (OSRAM, Philips, Sunlux) la durée de vie d'une lampe est fortement variable avec la température de service de cette dernière. Il n'existe malheureusement pas de loi similaire à celle de condensateur (Loi de Weibull) permettant de définir cette durée de vie en fonction de la température. L'augmentation de la durée de vie d'une lampe a un impact sur l'environnement et sur les coûts d'exploitations.

3. *Economie sur la climatisation*

Le rendement énergétique d'une lampe est faible (6% à 50%). La majorité de l'énergie apportée est transformée en chaleur. En conséquence, une diminution de 20% par exemple de la consommation d'énergie se traduira par une diminution d'une valeur presque identique de l'énergie calorifique. Pour un éclairage situé dans une zone climatisée, il y a un gain sur la consommation électrique de la climatisation. Là encore il y a un impact direct sur l'environnement et les coûts d'exploitations.

4. *Economie financière*

Les économiseurs d'énergies par abaissement de la tension sont financièrement intéressants puisqu'à la diminution de la consommation électrique sur l'éclairage et la climatisation, il faut encore compter sur une augmentation de la durée de vie des sources lumineuses.

Yverdon-les-Bains, le 7 juillet 2004

André Perrenoud
Ing.-Phys. EPFL, Dr ès Sciences
Adjoint scientifique

Marc Correvon
Ing. Dipl. EPFL
Professeur

Références

- [1] LEC + Ecolite, Economiseurs d'énergie pour la lumière
Cahier des charges
Séance de travail du 3 mars 2004 chez Lexen SA.
- [2] Offre de mandat N° : MCN_LEX-001
15 mars 2004
- [3] LEC Con 25 Single Phase– Economiseur d'énergie pour la lumière
Mode d'emploi
- [4] LEC A – Economiseur d'énergie pour la lumière
Mode d'emploi
- [5] Hertzog Pascal, OSRAM , Présentation faite à la Journée Technique 2003, CSEEE Paris.
www.cseee.fr/divers/ressources/JT03OSRAM.pdf

Annexe - Inventaire des lampes et des ballasts utilisés

Lampe OSRAM	Ballast ferromagnétique N°	Ballast électronique N°	Remarque
NAV-T 100W	2	3	Sodium HP Variation admise +/- 5%
HQI-T 250 W/D	1	-	Halogénures métalliques Variation admise +/- 5%
HQL (MBF-U) 125 W	2	-	Vapeur de mercure
HQL (MBF-U) 80 W	2	4	Vapeur de mercure
NAV-E 110W 125W	2	3	Sodium HP

No	Type		Remarques
1	Ferromagnétique	Leuenberger Typ 220-230 Art. 280.10.04	Halogène ou Sodium 250 W I=3.0A cos ϕ = 0.43
2	Ferromagnétique	Schwabe Q125/80 Best. Nr 925 504	Vapeur de mercure 220V 50Hz 125 W cos ϕ = 0.55 80W cos ϕ = 0.51
3	Electronique	Leuenberger N-polyprof Art 222.00.11.000	VG zu SDW Lampe 100W 50 Hz U _N = 220 I = 0.55 cos ϕ = 0.9 U _N = 240 I = 0.51 cos ϕ = 0.9
4	Electronique	Leuenberger 230AA/Aevc Art. 235.08.41	VG zu HG Lampe 50/80W 230 V 50 Hz P IL I1 cos ϕ 50W 0.62 0.27 1.0 80W 0.8 0.42 0.96

VG : Vorschaltgerät

SD : Sodium Dampf