

7^e année

La Revue SEE



Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>



Crédit photo : OSRAM Communication

L'éclairage

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

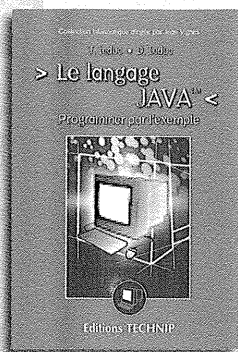


*Société de l'Electricité, de l'Electronique
et des Technologies de l'Information
et de la Communication*

N° 24 - Mars 2001

Introduction à la théorie du signal et de l'information. Cours et exercices

Une présentation rigoureuse des techniques de traitement du signal, illustrée par des exercices corrigés abordant des situations concrètes souvent liées à des applications industrielles. F. Auger. Broché, 480 p. €44,21 / 290 FF



Le langage Java™ Programmer par l'exemple

Une approche résolument pédagogique, pratique et progressive pour découvrir ou redécouvrir le langage Java. T. Leduc, D. Leduc. Broché, 288 p. €28,97 / 190 FF

Automatique des systèmes échantillonnés

Éléments de cours et exercices résolus

Les aspects fondamentaux de la modélisation, de l'analyse et de la commande des processus continus à commande échantillonnée. Ph. Vanheeghe, Ch. Sueur, P. Borne. Broché, 192 p. €32,01 / 210 FF

Régulation industrielle. Problèmes résolus

Formulation et résolution de 40 problèmes et cas concrets posés dans l'industrie. M. Ksouri, P. Borne. Broché, 248 p. €36,59 / 240 FF

Asservissements et régulations continus

Analyse et synthèse. Problèmes avec solutions

Des thèmes variés illustrés par des cas réels rencontrés dans l'industrie. Treize problèmes avec corrigés complets couvrent la majorité des sujets rencontrés en examen d'automatique dans les écoles d'ingénieurs. E. Boillot. Broché, 216 p. €32,01 / 210 FF

Estimation, prédiction

Éléments de cours et exercices résolus

Une présentation des méthodes et des exemples spécialement choisis en vue d'une application à des problèmes industriels.

E. Duflos, Ph. Vanheeghe. Broché, 176 p. €27,44 / 180 FF

Identification et commande numérique des procédés industriels

Tous les éléments théoriques et pratiques nécessaires à la mise en œuvre d'une commande numérique à caractère adaptatif.

R. Ben Abdennour, P. Borne, M. Ksouri, F. M'sahli. Relié, 256 p. €44,21 / 290 FF

Nouveauté

Nouveauté

Nouveauté

Nouveauté

Nouveauté

t Editions TECHNIP

27, rue Ginoux, 75737 Paris Cedex 15 • Tél. 01 45 78 33 80
Fax 01 45 75 37 11 • E-mail : info@editionstechnip.com

www.editionstechnip.com

Les bases indispensables de l'électronique de l'ingénieur !

Introduction à l'électronique et à ses applications en instrumentation

Éditions Tec & Doc
448 pages, 15,5 x 24
nombr. sch. et tabl., 2001
ISBN : 2-7430-0423-1
450 FF / 68,60 €

Hervé Buyse
Francis Labrique
Paul Sente

Introduction à l'électronique et à ses applications en instrumentation

Éditions
TEC
& DOC

Issu des enseignements donnés par les auteurs à l'Université catholique de Louvain, cet ouvrage constitue une synthèse des connaissances indispensables à tous ceux, quelles que soient leurs spécialités, qui sont ou seront confrontés à l'électronique à travers ses applications en mesure, instrumentation et commande automatique. Ce livre est divisé en quatre parties développant :

- le rappel des éléments de la théorie des circuits ;
- l'électronique analogique ;
- l'électronique digitale ;
- l'instrumentation dans les systèmes automatisés.

Hervé Buyse, Francis Labrique, Paul Sente
sont tous les trois membres du Laboratoire d'électrotechnique et d'instrumentation de l'Université catholique de Louvain.

Avec cette initiation à l'électronique, le lecteur pourra mieux appréhender le fonctionnement des circuits électroniques, analogiques ou digitaux, qui permettent d'assurer l'ensemble des opérations de traitement des signaux. Cet ouvrage est destiné à un large public d'ingénieurs, de chercheurs et techniciens, non spécialisés en électronique, confrontés quotidiennement à une instrumentation sophistiquée, notamment en agronomie, en chimie, en bioindustries... Son approche pédagogique en fait un outil idéal de la formation des futurs ingénieurs, des étudiants de 2^e cycle, des IUT et des BTS.

Sommaire

Rappels de théorie des circuits
Les fonctions de base de l'électronique analogique
Les fonctions de base de l'électronique digitale
L'instrumentation dans les systèmes automatisés
Références - Index alphabétique

www.Lavoisier.fr

En vente chez votre libraire habituel ou à la librairie Lavoisier, 11 rue Lavoisier - 75008 Paris



**SOCIETE de l'ELECTRICITE, de l'ELECTRONIQUE et des
TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.**
11117, rue Hamelin, PARIS CEDEX 16
Tel : 01 56 90 37 00 fax : 01 56 90 37 19

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886
Siret 785 393 232 00026, APE 731 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

La REVUE 3EI publication trimestrielle du **Cercle Thématique 13-01 de la SEE :**
Enseignement de l'Electrotechnique et de l'Electronique Industrielle.

<p>Edition SEE, 11/17 rue HAMELIN 75 783 PARIS CEDEX 16</p> <p>Directeur de la publication François AILLERET Président de la SEE</p> <p>Rédacteur en Chef François BOUCHER</p> <p>Equipe de Rédaction Animateurs : Marie-Michèle LE BIHAN Gérard DELAVIER</p> <p>Gilles FELD Brigitte GRELAUD Jean-Philippe ILARY Pascal LOOS Philippe NEVEU Oviglio SALA Michel THION</p> <p>Site WEB (lesite3EI.com) Responsable : Philippe LE BRUN</p> <p>Fabrice BAUDOIN Jean-Pierre TAREL Jean-Philippe ILARY</p> <p>Comité de lecture Jean-Pierre CARON Jean FAUCHER (ENSEEHT) François FOREST (Univ. de Montpellier II) Michel LAVABRE (ENS-Cachan) Michel MEUNIER (SUPELEC) Bernard. MULTON (ENS-Cachan, Antenne de Bretagne) Jean-Marie PETER (SEE)</p> <p>Abonnement annuel (4 numéros) Année scolaire 2000/2001, tarifs TTC :</p> <p>Individuel : France et CEE.....195 F (29.73 €) Pays hors CEE.....260 F (39.64 €)</p> <p>Collectivités France et CEE.....250 F (38.11 €) Pays hors CEE.....320 F (48.78 €)</p> <p>Réalisation et impression (1000 ex) Repro-Systèmes 23, rue de Verdun 77 181 Le Pin</p> <p>Routage et Expédition Départ Presse ZI les Richardets 93 966 Noisy le Grand</p> <p>Dépôt Légal : mars 2001 Commission Paritaire 1202 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n°24 Thème : l'éclairage</p> <p>p. 1 Sommaire.</p> <p>p. 2 Editorial</p> <p>p. 3 Publications</p> <hr/> <p style="text-align: right;">Thème</p> <p>p.7 L'éclairage en France : une lecture à travers une grille d'analyse énergétique et environnementale. Hervé LEFEBVRE , ADEME 06 560 VALBONNE.</p> <p>p.11 Sources de lumières : un pari pour l'avenir. Georges ZISSIS, Jean Jacques DAMELINCOURT, CPAT, 31 062 TOULOUSE.</p> <p>p.19 Courants harmoniques émis par les lampes à décharge; interaction avec le réseau. Eric ROAUX, Expert AFE</p> <p>p.24 Eclairage et électronique de puissance. Patrick SOUILLAC, 88 000 EPINAL.</p> <p>p.31 Une commande simple pour lampe à décharge haute intensité au xénon. George GOH, ZETEX, Traduction de Patrick SOUILLAC, 88 000 EPINAL</p> <hr/> <p style="text-align: right;">Pratiques pédagogiques</p> <p>p.35 Comment mener un avant-projet d'éclairage intérieur. Patrick VANDERPLANQUE, IUT de Béthune.</p> <hr/> <p style="text-align: right;">Recherche et développement</p> <p>p.41 Mise en œuvre de module IGBT sur les onduleurs auxiliaires des motrices TGV. A. JEUNESSE, P. LAUPRETE, J. MULLER, SNCF G. COQUERY, R. LALLEMAND, J. P. OUSTEN , INRETS.</p> <p>p.52 Alimentation d'une machine asynchrone par un onduleur de tension M. L. I. naturelle et suboptimale. T. ROUKIA, D. ROUKIA, LMC BEJAIA, ALGERIE, B. LAPORTE, GREEN, VANDOEUVRE LES NANCY.</p> <hr/> <p style="text-align: right;">Histoire des sciences</p> <p>p.62 Les premiers pas de l'éclairage en France au 19^e siècle. J. P. CARON, Comité de lecture de La Revue 3EI.</p> <hr/> <p style="text-align: right;">Thème : l'éclairage ; aspect physiologique</p> <p>p.71 Lumière et environnement visuel J. J. DAMELINCOURT, CPAT TOULOUSE, P. LOOS, GREEN, VANDOEUVRE LES NANCY.</p>
---	--

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente édition, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées.
Toutefois des copies peuvent être utilisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris, auquel la Revue 3EI a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs. (loi du 11 mars 1957, art.40 et 41 et Code Pénal art. 425).

Promesse non tenue par La Revue 3EI

Bien qu'annoncées dans le numéro 23, les pages en couleur ne seront pas pour cette fois insérées dans votre revue, et pourtant elles auraient été nécessaires. Un numéro dont le thème est l'éclairage se doit de fournir des exemples où lumière et couleurs doivent être les sources d'images magnifiques.

Le coût de l'insertion de pages en quadrichromie est élevé ; bien que souhaitées ces pages couleur ne seront pas dans ce numéro 24 car avant tout nous souhaitons maintenir l'équilibre financier de notre revue et il nous a semblé raisonnable de différer cette amélioration de présentation. Ce n'est que partie remise car cela demeure l'un de nos objectifs à atteindre en vue d'accroître la qualité de notre publication.

Grâce au site 3EI (lesite3EI.com) il nous est possible de fournir les éléments photographiques complémentaires aux articles publiés dans la revue tant pour les articles concernant l'éclairage que pour celui concernant le remplacement des GTO par des IGBT dans les convertisseurs des auxiliaires dans les rames TGV.

La SEE change d'adresse, la Revue 3EI aussi.

Pour nous contacter une adresse unique celle de la SEE. Depuis le 1^{er} février 2001, la SEE s'est installée dans ses nouveaux locaux de l'espace ELEC 11/17 rue Hamelin. Désormais, pour tout renseignement, suggestion, réclamation ou proposition d'article, écrivez à

**La Revue 3EI-SEE
11/17 rue HAMELIN, 75 783 PARIS CEDEX 16**

vous pouvez aussi nous contacter par fax au 01 56 90 37 19 ou par courrier électronique see@see.asso.fr **Ne téléphonez pas**, il est indispensable qu'une trace écrite de votre message existe pour qu'il soit transmis à l'un des membres de l'équipe 3EI lors de son passage régulier au siège.

Mais votre moyen de communication rapide est votre site : **lesite3EI.com**. Tout message, réclamation, proposition d'article est immédiatement transmis au membre de l'équipe à qui le message est destiné.

L'Equipe de rédaction de la Revue 3EI

Abonnement

Numéros 23 (décembre 2000), 24 (mars), 25 (juin), 26 (septembre 2001)

Adresser votre commande accompagnée du règlement à :

SEE-La Revue 3EI48, rue de la Procession, 75724 PARIS CEDEX 15

En précisant le lieu de l'expédition et le destinataire de la Revue.

Abonnement individuel :

Tarifs : 195 F TTC pour la France et pays de la CEE
260 F TTC pour les pays hors CEE.

Paiement par chèque joint à la commande.

Abonnement souscrit par bon de commande pour un organisme :

(bibliothèque, CDI, Laboratoire, Université, Ecole d'Ingénieurs, Lycée, IUT, Entreprise etc. ...)

Tarifs : 250 F TTC pour la France et pays de la CEE
320 F TTC pour les pays hors CEE.

Journées ELECTROTECHNIQUE du Club EEA, les 15 et 16 mars 2001,
Université Paul Sabatier à Toulouse .
Manifestation commune club EEA, et club Electrotechnologies et Enseignement (CEE)

" Arc électrique, la foudre en bouteille au service de l'électrotechnique "

Le recueil des actes de ces journées d'études est disponible au tarif de 100 F TTC, frais de port inclus.

Les intéressés peuvent

envoyer un bon de commande administratif, libellé "actes J. Et-2001" à l'ordre de l'ADPA
ou bien en faire la demande sur papier libre accompagné du règlement par chèque

à Georges ZISSIS
CPAT-UPS
118, route de Narbonne 31 062 TOULOUSE CEDEX 4

E. Mail : zissis@cpat.ups-tlse.fr

PERTURBATIONS HARMONIQUES,
effets, origines, mesures, diagnostics, remèdes.

E. FELICE.

Edition DUNOD, collection EEA série Electrotechnique (Broché 180 p.) 178 FF / 27.14 €.

Maîtriser la qualité de la tension sur les réseaux de distribution électrique est devenu un atout essentiel pour les entreprises dans un contexte concurrentiel accru. Les perturbations électriques entraînent des pertes d'informations sur les équipements informatiques, des déclenchements intempestifs de disjoncteurs, des échauffements de câbles, des pertes électriques importantes ou encore paralysie de l'outil de production.

Combattre ce fléau majeur que sont les perturbations harmoniques s'inscrit dans la démarche qualité de l'énergie électrique. Ce livre apporte une connaissance détaillée de ces phénomènes –enrichie d'exemples concrets-, explicite des solutions de mises en œuvre sur des sites industriels et précise les moyens et les techniques de mesures à utiliser sur le terrain.

Il constitue un outil précieux à l'usage des techniciens de l'industrie et des artisans électriciens. Tout étudiant en électrotechnique trouvera un intérêt évident à sa lecture.

AUTOMATIQUE DES SYSTEMES ECHANTILLONNES.

(Eléments de cours et exercices résolus.)

Ph. VANHEEGHE, Ch. SUEUR, P. BORNE.

Editions TECHNIP (Broché 176 p.) 180 FF / 27.44 €

Cet ouvrage présente les aspects fondamentaux relatifs à la modélisation, l'analyse et la commande des processus continus à commande échantillonnée.

La première partie reprend les notions indispensables sur l'échantillonnage, la transformée en z les fonctions de transfert en z , le comportement temporel des systèmes échantillonnés, l'étude des propriétés de stabilité et de précision. Le principe général de la commande échantillonnée est étudié et la présentation de différentes approches de la synthèse de régulations et de commandes échantillonnées, allant de la régulation PID à la commande RST, fait l'objet d'un développement particulier.

Dans la seconde partie, de nombreux exercices de mise en œuvre et d'application sont proposés, couvrant l'essentiel des problèmes usuellement rencontrés dans la mise en œuvre des commandes échantillonnées. La solution de chaque exercice est détaillée pour permettre au lecteur de mieux comprendre et de mieux assimiler les notions fondamentales de l'automatique des systèmes échantillonnés.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants du premier et du second cycle de l'enseignement supérieur désireux de s'initier aux systèmes échantillonnés (DUT, BTS, classes préparatoires, licences et maîtrises, écoles d'ingénieurs...)

ASSERVISSEMENTS ET REGULATIONS CONTINUS.

Analyse et synthèse. (Problèmes avec solutions).

E. BOILLOT.

Editions TECHNIP (Broché 216 p.) 210 FF / 32.01 €.

Cet ouvrage, composé de treize problèmes avec leur corrigé complet, est le fruit d'enseignants-chercheurs et de professeurs de grandes écoles d'ingénieurs. Les thèmes retenus sont variés et traitent de cas réels rencontrés dans différents domaines de l'industrie : mécanique, aéronautique, domotique, thermodynamique, hydraulique, agroalimentaire...

Chaque problème est abordé par les méthodes fréquentielles classiques de l'Automatique et comporte deux parties : la modélisation et l'analyse du système étudié ; l'étude des lois de commande visant à respecter les performances en stabilité et précision.

Les corrigés fournissent des solutions très complètes aux problèmes proposés.

Ces problèmes, donnés comme sujets d'examen d'Automatique à Supélec et dans d'autres écoles d'ingénieurs, ont été testés auprès d'élèves ingénieurs. Leurs solutions sont donc parfaitement validées.

ESTIMATION, PREDICTION.

(Eléments de cours et exercices résolus.)

E. DUFLOS, Ph. VANHEEGHE.

Editions TECHNIP (Broché 176 p.) 180 FF / 27.44 €.

L'estimation et la prédiction de paramètres sont des « problèmes de décision » qui connaissent de nombreuses applications dans le domaine des sciences de l'ingénieur.

Cet ouvrage présente de façon synthétique l'essentiel de ce qu'il faut savoir en estimation et prédiction pour permettre au lecteur (étudiant, technicien ou ingénieur) une mise en œuvre aisée. A cette fin, il se concentre sur les notions et méthodes nécessaires à des applications dans l'industrie.

Après avoir familiarisé le lecteur avec la notion d'estimateur, le livre associe des rappels théoriques à des exercices soigneusement choisis en vue de l'application à des problèmes industriels ou de recherche. L'approche est pragmatique, les solutions des exercices sont extrêmement détaillées, ce que le l'utilisateur appréciera. Au total, 25 exercices sont proposés.

ENTRAÎNEMENTS ELECTRIQUES A VITESSE VARIABLE.

PROMETHEE, Groupe SCHNEIDER, Editions Tec & Doc, LAVOISIER.

Tome I J. BONAL (410 p.) 450 FF / 68.60 €.

Rappels d'électrotechnique et de mécanique. Les procédés de variation de vitesse.

Tome II J. BONAL (448 p.) 470 FF / 71.65 €.

Rappels d'électronique de puissance et d'automatique. Les variateurs électroniques de vitesse.

Tome III J. BONAL, G. SEGUIER (364 p.) 450 FF / 68.60 €.

Interactions convertisseur, moteur, charge et convertisseur réseau.

**INTRODUCTION A L'ELECTRONIQUE ET A SES APPLICATIONS
EN INSTRUMENTATION.**

H. BUYSE, F. LABRIQUE, P. SENTE -

Editions Tec & Doc-LAVOISIER (448 pages) 450 FF / 68.60 €

Issu des enseignements donnés à l'Université Catholique de Louvain, cet ouvrage constitue une synthèse des connaissances indispensables à tous ceux, quelles que soient leurs spécialités, qui sont ou seront confrontés à l'électronique à travers ses applications en mesure, instrumentation et commande automatique. Ce livre est divisé en quatre parties développant :

- le rappel des éléments de la théorie des circuits ;
- l'électronique analogique ;
- l'électronique digitale ;
- l'instrumentation dans les systèmes automatisés.

Avec cette initiation à l'électronique, le lecteur pourra mieux appréhender le fonctionnement des circuits électroniques, analogiques ou digitaux, qui permettent d'assurer l'ensemble des opérations de traitement des signaux.

Cet ouvrage est destiné à un large public d'ingénieurs, de chercheurs et techniciens, non spécialisés en électronique, confrontés quotidiennement à une instrumentation sophistiquée, notamment en agronomie, en chimie, en bio-industries... Son approche pédagogique en fait un outil idéal de la formation des futurs ingénieurs, des étudiants du 2^e cycle, des I.U.T. et des B.T.S.

COMMANDE DES MOTEURS ASYNCHRONES.

*sous la direction de Carlos CANUDAS DE WIT,
LAG-ENSIEG- Editions HERMES*

L'émergence simultanée des processeurs numériques à haute fréquence et des exigences croissantes en matière de régulation des moteurs asynchrones a impulsé des travaux de recherche sur les techniques de pilotage de machines et sur les structures nouvelles de commande numérique.

Volume 1: Modélisation, contrôle vectoriel et DTC –

(264 p.)-459,17FF / 70 €

Ce volume retrace les problèmes de commande de la machine, depuis sa composition interne jusqu'à la commande directe de couple, en passant par sa modélisation, les structures de commande classique, et son positionnement dans le milieu industriel.

Volume 2: Optimisation, discrétisation et observateurs-

(288 p.)-459,17FF / 70 €

Ce volume complète les sujets abordés dans le volume 1, en traitant les questions liées à la commande optimale, à la commande échantillonnée, et présente différents observateurs nécessaires au bon fonctionnement de la machine.

LES BOND GRAPHS

*sous la direction de Geneviève DAUPHIN-TANGUY, Ecole Centrale de Lille-
Editions HERMES (384 p.) 590,36 FF / 90€*

Par son langage unifié pour tous les domaines de la physique et son caractère graphique, la méthodologie bond graph peut être un support de communication entre spécialistes de disciplines différentes. Elle est fondée sur une étude des transferts de puissance au sein du système étudié, et une définition des hypothèses de modélisation sur des critères physiques. Le modèle bond graph se situe comme intermédiaire entre le système physique et les modèles mathématiques qui lui sont associés (matrice de transfert dans le cas linéaire, équation d'état linéaire ou non-linéaire, systèmes d'équations différentielles d'ordre deux).

Ce livre est le premier ouvrage sur la méthodologie bond graph. C'est aussi un ouvrage original par rapport aux autres parutions internationales, par l'étendue des domaines d'applications abordées, l'introduction des aspects analyse et commande et la présentation de l'utilisation des bond graphs en mécatronique appliquée à l'automobile.

MATLAB[®], SIMULINK[®], STATEFLOW[®], avec des exercices d'automatique résolus.

M. RIVOIRE, J. L. FERRIER.

Editions TECHNIP (Broché 302 p.) 220 FF / 33.54 €.

MATLAB[®], Simulink[®] et Stateflow[®] constituent un ensemble logiciel utilisé dans les universités et les laboratoires industriels du monde entier. MATLAB est le noyau de calcul scientifique, Simulink est dédié à la simulation du fonctionnement des systèmes continus ou échantillonnés, représentés simplement par leur schéma-bloc, et Stateflow permet la mise au point et le test des systèmes à événements discrets et, plus largement, des systèmes hybrides.

Cet ouvrage est à la fois :

- un manuel d'apprentissage rapide des fonctionnalités essentielles de ces trois logiciels ;
- un recueil d'exercices d'automatique et de physique résolus. Ces exercices sont accompagnés d'une solution mise en œuvre avec l'aide logicielle correcteur PID, correction numérique, exemple de logique floue, retour d'état, exemple de système complet incluant des modes de marche gérés par Grafset, etc. .

Ce livre s'adresse en priorité aux étudiants de premier cycle (DUT, BTS, classes préparatoires) et aux techniciens évoluant dans le domaine de l'automatique.

INITIATION A LA PROGRAMMATION AVEC SCHEME.

L. BLOCH.

Edition TECHNIP (Broché 228 p.) 210 FF / 32.01 €.

Cet ouvrage est un cours de programmation basé sur le langage *Scheme*, accessible au non-informaticien, scientifique, économiste ou gestionnaire. Aucune compétence mathématique n'est demandée au lecteur, ce qui différencie ce livre de bien d'autres manuels.

Un langage de programmation dont la clarté des concepts et la simplicité de la syntaxe facilitent l'apprentissage, sans sacrifier rigueur et puissance.

LE LANGAGE JAVA.. Programmer par l'exemple.

T. LEDUC, D. LEDUC.

Edition TECHNIP (Broché 267 p.) 190 FF / 28.97 €.

Une approche résolument pédagogique, pratique et progressive pour découvrir ou redécouvrir le langage Java destiné au développeur ou concepteur d'applications, élève ingénieur, étudiant, informaticien ou non, simple curieux...

LES LOGICIELS DE GESTION HAUTEMENT INTEGRES.

Préparation par l'ingénierie de métier.

J. M. TYSEBAERT.

Edition TECHNIP (Broché 216 p.) 240 FF / 36.59 €.

Précise les contraintes des logiciels de gestion, développe la notion d'ingénierie de métier et facilite le dialogue entre les installateurs et les opérateurs dans l'entreprise.

Basé sur un enseignement dispensé à l'Ecole Centrale de Lille, l'ouvrage s'adresse principalement aux élèves ingénieurs et aux informaticiens voulant s'orienter vers la gestion ou l'informatique de gestion.

Exposition VOLTA

"De l'étincelle à la pile"

au

Musée des arts et métiers

60, rue Réaumur - 75003 PARIS

Ouvert tous les jours de 10h à 18h, sauf le lundi et les jours fériés ;
nocturnes les jeudis jusqu'à 21h30.

Renseignements : tél 01 53 01 82 00

Date de clôture : 14 mai (prolongation probable)

Si vous êtes amateur de beaux objets scientifiques et instruments de mesure anciens, vous serez émerveillé par la très belle exposition consacrée aux matériels d'expériences pour l'électrostatique (18ème siècle) et aux premiers générateurs électrochimiques à empilement (pile de VOLTA) et à auges. Vous pourrez également, en visitant le musée, contempler les premières machines électriques industrielles dans la salle qui leur est réservée.

La revue du Musée des arts et métiers de mars 2001 est en grande partie dédiée à l'exposition.

L'ECLAIRAGE EN FRANCE : UNE LECTURE A TRAVERS UNE GRILLE D'ANALYSE ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENTALE.

Hervé LEFEBVRE

ADEME

500 route des Lucioles, 06560 Valbonne

herve.lefebvre@ademe.fr

Résumé : avec une consommation d'électricité supérieure à 40 TWh, l'éclairage représente 10% de la consommation nationale d'électricité. La répartition des consommations par secteur d'activité présente de fortes disparités mais pour l'ensemble de ces secteurs les consommations sont orientées à la hausse. Parallèlement à ce constat, les technologies d'éclairage performant existent sur le marché, nous devons les promouvoir afin de maîtriser les consommations liées à cet usage et réduire l'impact de l'éclairage sur les émissions de gaz à effet de serre.

Introduction.

Voilà plus d'un siècle que l'éclairage électrique est entré dans nos modes de vie. Indispensable pour nos activités, l'éclairage fait partie de notre quotidien au travail, à notre domicile, pour nos loisirs. L'ensemble des secteurs économiques utilise et consomme de l'éclairage, et très souvent sans avoir connaissance des coûts liés à cet usage.

L'objectif de cet article est de révéler ou tout au moins de rappeler, la part importante de l'éclairage dans la consommation énergétique nationale et également son impact sur l'environnement. Au travers de l'examen du secteur résidentiel nous analyserons les effets d'une action de maîtrise de la demande d'électricité visant à promouvoir les technologies performantes de l'éclairage.

1 Des consommations orientées à la hausse.

Les coûts liés à l'éclairage sont rarement pris en considération, car rapportés à une unité de lieu (un logement, un bureau) ils demeurent relativement faibles. Pour un logement le coût d'utilisation de l'éclairage est estimé en moyenne à 350 F par an, et pour une activité de bureaux le poids de l'éclairage

sur charges d'exploitation est de 18%. Pourtant, à l'échelle de la nation, l'éclairage représente 10% des consommations totales d'électricité, ce qui est loin d'être négligeable. En 1999, la consommation électrique française a été de l'ordre de 400 TWh (400 milliards de kWh) et la part de l'éclairage s'élevait à 41 TWh avec une décomposition par secteur très différente comme le montre le tableau 1.

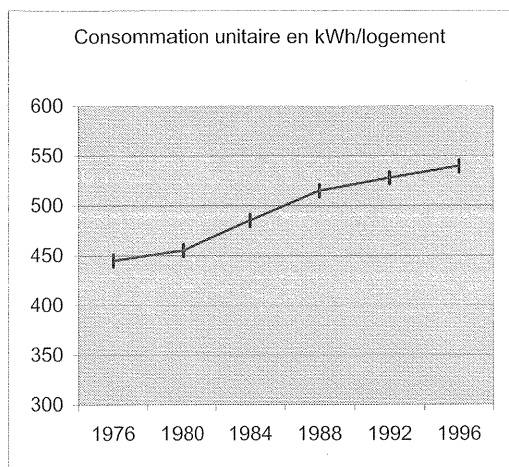
Tab. 1 : Consommations d'électricité pour l'éclairage.

1999	En TWh
Eclairage public	4,7
Eclairage résidentiel	13,9
Eclairage Tertiaire et Industrie	27,2
Total Eclairage	41,1

Source: Inestène, 2000

De 1979 à 1999, la consommation d'éclairage du secteur résidentiel est passée de 5 TWh à 13,9 TWh. Une partie de la croissance est directement liée au développement des constructions neuves mais il faut également ajouter un nombre croissant de points lumineux par logement entraînant une consommation au m² plus élevée (cf. graphique 1.)

Graphique 1 : Evolution de la consommation d'éclairage en kWh/an/logement.



Pour les autres secteurs, la répartition des consommations liées à l'éclairage par segment d'activité et le poids de ces consommations sur la facture globale d'électricité présentent de fortes disparités qui sont liées non seulement au temps d'utilisation des systèmes d'éclairage et au besoin de niveau d'éclairage mais aussi au mode de chauffage et aux process électriques utilisés. Ainsi la part de l'éclairage sur la facture globale d'électricité peut varier de 15 à 50% comme l'indique le tableau 2.

Tab. 2 : consommation d'électricité pour l'éclairage par segment d'activité, en 1999.

Secteur considéré	Consom. en TWh	Poids sur la facture globale d'électricité
Industrie	5,1	15%
Collectivités locales	6,3	50%*
Commerces	6,5	23%
Bureaux	6,2	30%
Santé	2,2	50%
Enseignement, culture, loisirs	3,5	39%
Café hôtels restaurants	1,2	n.c.

* dont 33% éclairage public

Source : INESTENE 2000 et EDF

Pour tous les secteurs d'activité, la part de l'éclairage dans la facture énergétique est significative. Dès lors, des actions visant à réduire les consommations tout en assurant un maintien de la qualité du service sont justifiées. Elles le sont d'autant plus que les technologies d'éclairage performant existent sur le marché et que les projections indiquent que la demande d'éclairage va croître dans les prochaines années. Dans les scénarii développés par le bureau d'étude Inestène pour l'ADEME, il ressort que la consommation d'électricité induite par l'éclairage devrait croître d'environ 12% de 2000 à 2010 pour atteindre 58 TWh en 2020. Inversement, la

diffusion de technologies performantes induirait un potentiel de maîtrise de la demande d'électricité (MDE) de l'ordre de 14,4 TWh à l'horizon 2020.

Par ailleurs, l'analyse de la courbe de charge nationale montre une très forte participation de l'éclairage, notamment résidentiel, aux pointes du matin et du soir. La participation de l'éclairage à la pointe journalière de 20h est estimée à environ 17% de l'appel de puissance total. La diffusion de sources d'éclairage performant induirait une réduction de plus de 50% de la puissance appelée sur la pointe de 20 heures. Il faut toutefois rappeler qu'un potentiel économique ne peut être traduit intégralement en potentiel d'économie d'énergie mobilisable. Les préférences individuelles des usagers peuvent conduire à adopter des sources moins efficaces même si ce choix est non-économique.

De plus, il faut tenir compte de l'impact des consommations d'éclairage sur l'environnement. Chaque kWh consommé contient plus ou moins de CO₂ en fonction de la place prise par chaque usage sur la courbe de charge. Du fait des moyens de production disponibles (nucléaire, hydraulique, charbon et gaz) la consommation liée à un usage donné aura un contenu en CO₂ différent suivant qu'elle intervient en pointe, en semi-base ou en base. De ce fait, nous prenons comme référence un contenu de 290g de CO₂ pour un kWh utilisé en éclairage pour le résidentiel et 183g de CO₂ pour un kWh utilisé en éclairage pour le tertiaire.

La mise en oeuvre d'un programme de MDE sur l'éclairage aura donc trois objectifs :

- réduire les consommations du parc national en favorisant la diffusion des technologies performantes;
- réduire les appels de puissance en période de pointe;
- réduire par ce fait les émissions de CO₂.

2/ Impacts d'un programme de MDE éclairage dans le secteur résidentiel.

La consommation totale d'électricité pour l'éclairage dans le résidentiel et pour l'ensemble des 15 pays de l'U.E. est d'environ 86 TWh, représentant 17% de la consommation d'électricité domestique de l'U.E. Elle devrait être de 102 TWh en 2020. Ce niveau de consommation se situe entre celui des appareils de froid et celui des appareils de lavage (23% et 12% de la consommation domestique d'électricité respectivement.) Les consommations annuelles moyennes d'éclairage pour un ménage varient entre 240 kWh/an et 920 kWh/an, à travers les pays de l'UE. Une partie de ces écarts peut s'expliquer facilement par les différences de zones géographiques entre les pays de l'UE et plus précisément entre les pays Nordiques et les pays du pourtour méditerranéen.

La part de l'électricité utilisée pour l'éclairage dans la consommation globale d'électricité des ménages varie de 7 à 27% selon les pays (11,5 % pour la France), en fonction de la nature des autres usages électriques dans la maison, et notamment de la présence ou non d'un chauffage électrique. D'autres paramètres interviennent aussi pour expliquer cet écart :

- le nombre d'ampoules;
- les puissances installées des ampoules;
- les durées d'utilisation.

Ces variables sont à leur tour influencées par un éventail d'autres facteurs tels que la taille de la maison, du nombre de personnes, du revenu du ménage et la culture du pays.

En France, si la part de l'éclairage sur la facture électrique est relativement faible comparée à la moyenne européenne (17%), ce phénomène s'explique par l'importance du chauffage électrique dans le résidentiel. En ne considérant que les usages spécifiques de l'électricité, l'éclairage représente toutefois 24% de la consommation du secteur résidentiel du fait du nombre croissants de points lumineux par logement, de l'utilisation de sources lumineuses énergivores (les halogènes), du nombre croissant de pièces par logement, etc....

L'identification des facteurs influençant la consommation imputable au poste éclairage, et la hiérarchisation de ces facteurs selon leur impact sur le niveau de consommation n'est pas facile à réaliser. L'étude SOFRES, réalisée en 2000, donne quelques informations sur le comportement des ménages français vis à vis de leur système d'éclairage :

- les ménages ont en moyenne 23 lampes par foyers et 18 luminaires;
- les sources à incandescence représentent 86% du taux d'équipement (dont 7% pour les halogènes);
- les sources lumineuses fluorescentes 14% (6.5% pour les lampes basse consommation.)

Les tubes fluorescents sont principalement utilisés pour l'éclairage de la cuisine. Pour l'éclairage d'ambiance, l'incandescence est choisie à hauteur de 46%; viennent ensuite l'éclairage halogène (30%) et les lampes basse consommation (22%). En ce qui concerne l'éclairage halogène, le profil de ceux qui le préfèrent est bien marqué: il s'agit plus volontiers de jeunes (moins de 35 ans), de cadres supérieurs et des professions libérales, habitants de très grandes villes ou dans l'agglomération parisienne.

Le secteur résidentiel est donc encore largement dominé par l'éclairage incandescent. Après un développement rapide de l'éclairage halogène dans les années 80, on voit apparaître progressivement un éclairage plus sophistiqué à base de lampes halogène basse tension, moins consommatrices d'énergie. Cependant, le gisement d'économie le plus

prometteur est le remplacement des lampes à incandescence classiques par des lampes basse consommation sur les points lumineux qui ont des durées d'utilisation élevées. Evaluons par exemple l'impact du remplacement de 2 lampes à incandescence par 2 lampes basse consommation (LBC) dans chaque ménage.

Les lampes de la cuisine, de la salle à manger et du salon ont des temps de fonctionnement suffisamment longs (>3 heures/jour) pour rentabiliser l'usage des LBC dont le prix est supérieur aux lampes traditionnelles mais qui offrent une efficacité lumineuse jusqu'à 5 fois supérieure et durent jusqu'à dix fois plus longtemps. La substitution simulée concerne deux lampes de 100W remplacées par des LFC de 20W. En pointe, la puissance économisée serait de 2,1 GW et en terme de volume d'électricité économisé, on atteindrait 3,9 TWh par an (source Inestène, 1999). Les émissions évitées de CO₂ s'élèveraient à 224 ktonnes de CO₂. Les résultats financiers correspondants sont donnés dans le tableau 3.

Tab. 3 : résultats financiers du placement de 2 LBC par ménage

Economies annuelles de consommation en TWh	3,9
Economies annuelles de production en TWh	4,3
Pertes de recettes pour le producteur (en millions de Francs)	2 049
Coûts évités pour le producteur (en millions de Francs)	2 764
Bilan pour le producteur (en millions de Francs)	715
Economies annuelles de fonctionnement pour un ménage (en F TTC)	120
Investissement initial par ménage (en F TTC)	120

Source : Inestène 1999

Les économies d'électricité représentent un enjeu environnemental et financier important. L'éclairage constitue un des gisements d'économies d'électricité des plus rentables économiquement (il concerne la production de pointe) et l'un des plus rapidement mobilisable.

Conclusion.

L'éclairage est un service essentiel à nos activités. La disponibilité d'un système d'éclairage, le respect des niveaux d'éclairement, la qualité des installations sont des paramètres qui influencent notre bien être. Pour autant, nous devons prendre en considération l'efficacité énergétique des systèmes d'éclairage car l'éclairage représente une part

importante de nos consommations électriques, il intervient dans le dimensionnement de nos capacités de production électrique et a un impact sur l'environnement. Les efforts technologiques entrepris dans les technologies de la filière éclairage permettent, aujourd'hui, d'allier qualité d'éclairage et efficacité énergétique. La performance des systèmes d'éclairage doit tenir compte de ces deux contraintes.

La France s'est engagée dans le cadre du Protocole de Kyoto à stabiliser ses émissions de CO₂ en 2010 à leur niveau de 1990, pour atteindre cet objectif, elle s'est dotée d'un programme national de lutte contre le changement climatique. L'ADEME s'engage aux côtés de ses partenaires : EDF, l'Association française de l'éclairage et le Syndicat de l'Eclairage, pour développer et promouvoir les systèmes d'éclairage performant afin de maîtriser l'énergie et protéger l'environnement, tout en

garantissant un maintien de la qualité et du service rendu.

Pour en savoir plus.

INESTENE (1999), "Analyse des différents enjeux liés à la technologie des LBC", Etude pour l'ADEME, février 1999.

INESTENE (2000), "L'éclairage en France. Détermination des potentiels de MDE et des émissions de CO₂", Etude pour l'ADEME, juillet 2000.

SOFRES (1999), "L'éclairage dans votre logement", note de synthèse, Etude pour l'ADEME, novembre 1999.

SOURCES DE LUMIERE : UN PARI POUR L'AVENIR

Georges ZISSIS et J.J. DAMELIN COURT

CPAT – Univ. Toulouse III, 118 route de Narbonne

31062 Toulouse cedex 4

zissis@cpat.ups-tlse.fr

Peut-on imaginer un monde sans lumière artificielle ? Aujourd'hui les lampes électriques qui produisent la lumière assurant le bon déroulement des activités humaines consomment plus de 1/10 de l'énergie électrique que l'Homme produit. Peut-on inventer des sources de lumière plus efficaces ? La réponse est sans doute positive même si la technologie actuelle ne semble pas le permettre. Ce qui est certain en revanche c'est que cet objectif passe par une meilleure compréhension des principes qui gouvernent la production de lumière. Mieux comprendre le fonctionnement des sources de lumière nous permettra de les optimiser : c'est le pari pour les années à venir.

Introduction

Incapable de "dompter" les sources naturelles de rayonnement, l'Homme s'est efforcé de créer, tout d'abord pour s'éclairer, des sources artificielles. S'il a découvert assez rapidement le feu et l'incandescence, qui est l'une des deux façons d'exciter la matière afin de produire artificiellement un rayonnement, il lui a fallu attendre la découverte de l'électricité pour pouvoir utiliser la luminescence.

- En première approximation, on peut définir l'incandescence comme la production de lumière par un corps porté à une température suffisante, généralement au-dessus de 500°C pour les métaux. Ainsi, la lumière rouge ou blanche émise par un morceau de fer qu'on retire du feu en est un exemple typique. Quand on fait brûler une substance organique, elle se décompose en dégageant de la chaleur. Les produits de la décomposition, gaz ou particules de carbone agglomérées, sont portés à l'incandescence : ils émettent généralement cette lumière orangée qui caractérise les flammes.
- Cependant des phénomènes comme la phosphorescence et la fluorescence montraient de plus en plus nettement que la matière est capable d'émettre de la lumière sans qu'il soit besoin de la chauffer. Le savant allemand Wiedemann proposa, en 1888, d'appeler "luminescence" cette émission de lumière froide et de préciser éventuellement, au moyen d'un préfixe, son mode de production. Par exemple, l'électricité peut provoquer l'électroluminescence, qui fut sans doute la première luminescence observée par l'homme. La lueur des éclairs, en effet, n'a rien de commun avec celle des corps incandescents. Le Dr Wall, au XVIII^e siècle, soupçonnait déjà sa

nature électrique et comparait à un orage en miniature les étincelles qu'il tirait du pommeau de sa canne en le frottant. On a très rapidement compris que si l'on entretenait une décharge électrique dans un gaz, il était possible d'obtenir une émission stable de lumière dont la couleur dépendait du gaz employé. Depuis, on a réalisé de nombreux "éclairs artificiels" de formes et de couleurs variées.

Une lampe pour éclairer

L'information visuelle que recueille l'oeil et qu'analyse le cerveau résulte de la modification par les objets (réflexion, diffusion, absorption) du rayonnement émis par la source (Fig. 1). Que demande-t-on alors à une source de lumière destinée à l'éclairage ?

Pour répondre à cette question quelques connaissances sur le système visuel sont nécessaires. "Voir", résulte d'une suite d'événements complexes, dont seuls quelques éléments fondamentaux peuvent être retenus pour définir les caractéristiques de lumière nécessaires au système visuel. Ces caractéristiques dépendent tout d'abord du niveau lumineux auquel le système visuel doit travailler, sa réponse et ses possibilités d'analyse sont en effet très différentes aux faibles niveaux lumineux (la nuit tous les chats sont gris) ou en plein jour. Nous nous limiterons ici à la vision diurne, ou photopique, qui permet à la fois la vision précise et la perception des couleurs. Celle-ci est liée aux propriétés de la zone centrale de la rétine, ou fovéa, uniquement peuplée de cellules détectrices de type "cônes".

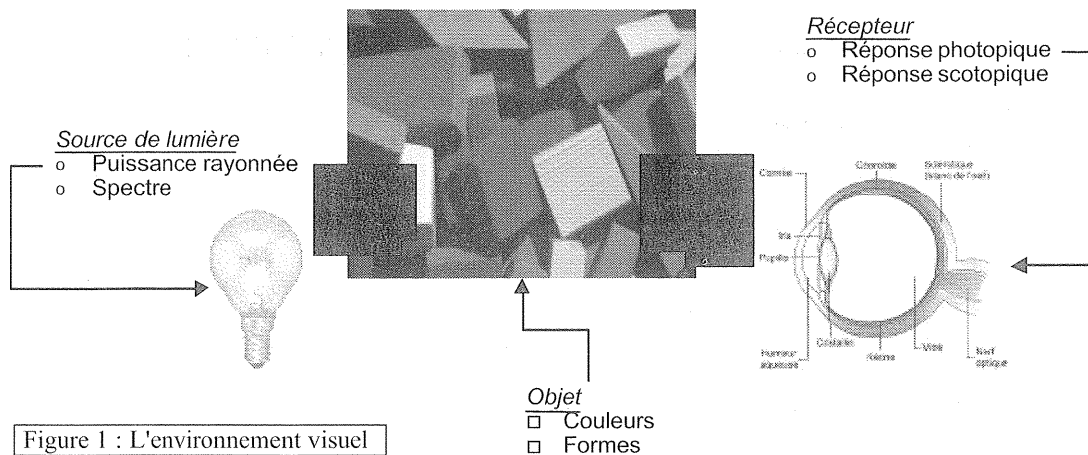


Figure 1 : L'environnement visuel

Ces cellules présentent en réalité trois types de réponses chromatiques très larges avec des maxima situés respectivement à 425nm pour les cônes bleu (cyanolabe ou S), 535nm pour les cônes vert (chlorolabe ou M) et 565nm pour les cônes rouge (érythrolabe ou L). La sensation colorée résulte de l'excitation différenciée de ces trois types de cônes rétiniens.

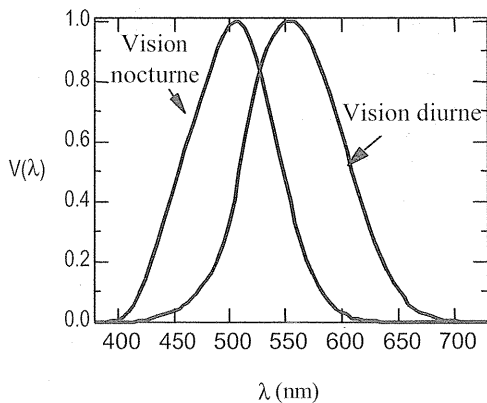


Figure 2 : Réponses scotopique (lune) et photopique (soleil) moyennes de l'oeil humain

Dans ce mode de fonctionnement, les propriétés les plus importantes de l'oeil, du point de vue de la définition de la source, sont certainement la sensibilité chromatique moyenne de la zone fovéale ainsi que ses propriétés de perception des sensations colorées. A ces propriétés correspondent deux impératifs et deux critères de choix pour les sources :

- l'efficacité lumineuse, qui mesure, en lumen/Watt, le flux lumineux émis (en lumen) par watt de puissance consommée,
- le rendu des couleurs, c'est-à-dire la production d'une lumière qui peut être considérée comme plus ou moins équivalente à une source de

référence de même température de couleur que la source étudiée.

Ce rendu des couleurs est caractérisé par deux grandeurs associées, la température de couleur de la source (en K) et son indice de rendu des couleurs (IRC max. 100). Pour des températures de couleur inférieures ou égales à 5000K la source de référence est le corps noir.

En fonction de l'application envisagée l'efficacité lumineuse et le rendu des couleurs ne sont pas d'égale importance. Ainsi, pour l'éclairage des routes, on devra utiliser des lampes ayant une grande efficacité, mais le rendu de couleur est secondaire. A l'opposé, l'éclairage des habitations nécessite un excellent rendu des couleurs si possible assorti à une bonne efficacité.

Les sources thermiques et les lampes à incandescence

La flamme (torche, chandelle, bougie, pétrole, gaz) est restée jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle la seule source pratique de lumière artificielle. C'est seulement dans les années 1870 que sont apparues les premières lampes à incandescence utilisant la luminosité d'un filament de carbone chauffé dans le vide. En 1911 Coolidge remplaça le carbone par du tungstène, la lampe à incandescence à filament de tungstène était née. Cette lampe fut successivement améliorée:

- en 1918, introduction d'un gaz rare (argon) pour ralentir l'évaporation du filament. Cet effet étant d'autant plus efficace que le gaz est plus lourd, l'argon a été remplacé par du krypton ou par un mélange krypton-xénon.

- Malheureusement l'introduction du gaz augmente les pertes thermiques. Une solution fut trouvée par Langmuir en 1936, le double puis le triple spirilage du filament. Ce procédé permet en effet de limiter

l'effet de la convection et réduit beaucoup les pertes thermiques.

Ces améliorations successives conduisirent aux lampes à incandescence d'éclairage général qui présentent (pour une lampe de 100W/230V) une efficacité lumineuse de l'ordre de 12 à 14 lm/W pour une durée de vie de 1000h et une température de couleur de 2700 à 2800K.

Malgré des progrès successifs, ces lampes restent sensibles à l'évaporation du tungstène et on est obligé d'utiliser des ampoules de grandes dimensions pour que le noircissement ne soit pas trop rapide.

Dans les années 1960 un nouveau pas fut franchi avec la mise au point des premières lampes à incandescence à halogène. Le principe de base de ces sources est d'utiliser un cycle d'halogène (iode, brome, composés halogénés) pour déplacer vers le filament chaud le tungstène évaporé déposé sur l'ampoule plus froide.

En effet, à la température de l'ampoule, l'halogène se combine au tungstène pour donner des composés moléculaires halogénés. Au voisinage du filament, ces composés se dissocient pour redonner des atomes de tungstène et l'halogène. Ces phénomènes d'association-dissociation induisent l'existence d'une zone moléculaire dans la zone périphérique de la lampe et d'une zone atomique au voisinage du filament. Il en résulte un double phénomène de diffusion, des molécules vers le filament (où elles se dissocient et déposent le tungstène), des atomes vers la paroi (où l'halogène se recombine au tungstène déposé).

Dans ces conditions, la paroi de l'ampoule reste claire, ce qui permet d'utiliser des ampoules de petites dimensions. Par ailleurs, le cycle d'halogène n'est possible que pour des températures de paroi supérieures à 400 ou 500K, on est donc amené à utiliser des ampoules de quartz. Ces enveloppes sont donc très solides et susceptibles de supporter de fortes pressions de gaz rare (plusieurs bars), cette augmentation de la concentration du gaz rare induit une diminution de l'évaporation et une augmentation de la durée de vie. En définitive on obtient des lampes dont l'efficacité est de 16 à 22 lm/W pour une température de couleur de 3000-3200K et une durée de vie de 2000h (4000h pour certaines lampes basse tension).

Cependant, ces sources, qui se comportent sensiblement dans le visible comme un corps gris, souffrent des limitations propres à ce type de radiateur. En effet, un corps noir (ou, à un coefficient près, un corps gris), ayant une température T_{CN} , présente un spectre d'émission continu dont la luminance spectrique $L_{CN,\lambda}(T_{CN})$ émise à une longueur d'onde λ , est fonction de la température du corps noir. Il s'agit d'une limite

supérieure absolue : aucun corps à l'équilibre ne peut émettre plus de rayonnement qu'un corps noir. Dans ce contexte, la portion du rayonnement visible produit par un corps noir s'exprime comme suit :

$$f_{vis}^{max}(T_{CN}) = \frac{\int_{400nm}^{800nm} L_{CN}(\lambda; T_{CN}) d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{CN}(\lambda; T_{CN}) d\lambda}$$

La figure 3 montre le "poids" du spectre visible dans l'émission totale du corps noir en fonction de la température de surface.

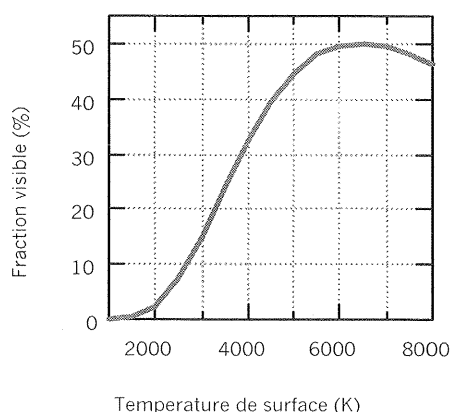


Figure 3 : Fraction de lumière visible émise entre 800 et 400nm par un corps noir à la température T_{CN}

Nous constatons que cette fraction ne peut en aucun cas dépasser la moitié de la puissance rayonnée totale. Par ailleurs aucun corps ne resterait solide à des températures de l'ordre de 5 à 6000K, le tungstène par exemple n'est pas utilisé au-dessus de 3200K. On constate que pour ces températures l'essentiel de la puissance est rayonnée dans l'infrarouge. Actuellement on cherche à réfléchir une partie de cet infrarouge vers le filament pour améliorer le bilan thermique, on espère ainsi obtenir des efficacités lumineuses supérieures à 30lm/W.

Il faut noter que, pour toutes ces lampes, les durées de vie annoncées résultent d'un compromis entre une température de filament la plus élevée possible (pour augmenter le flux lumineux) et la vitesse d'évaporation du tungstène qui, augmentant avec la température, réduit la durée de vie.

Lampes à décharge

Une lampe à décharge est constituée d'une enceinte étanche et transparente (ou translucide) qui laisse échapper le rayonnement que l'on veut utiliser. Cette enceinte, de forme et de dimensions très variables, contient un mélange de gaz et/ou de vapeurs métalliques, qui peut être traversé par une décharge. Or, s'il est impossible de porter un corps solide à une température de 5 à 6000K, il est par

contre assez facile d'obtenir de telles températures dans la décharge établie dans un gaz suffisamment dense (pression supérieure à 1 bar). Dans certaines parties de son spectre, le rayonnement du plasma gazeux approche alors le rayonnement du corps noir. Par ailleurs, il est possible dans une décharge, en modifiant la nature du mélange gazeux émissif, de modifier le rayonnement émis. La figure 4 illustre l'émission de raie (simplifiée) d'une décharge contenant de l'indium (bleu), du thallium (vert) et du sodium (orangé-rouge).

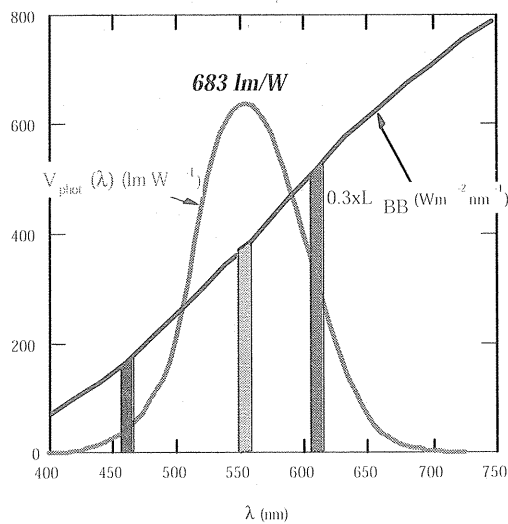


Figure 4: Spectre d'émission simplifié d'un mélange gazeux contenant de l'indium, du thallium et du sodium.

La densité des composants (ou la pression) est un paramètre déterminant des propriétés de la décharge. Le tableau I donne les valeurs de quelques grandeurs caractéristiques pour une décharge haute pression (quelques bar) et pour une décharge basse pression (quelques millibar).

Tableau I

Pression (P)	haute	basse
Densité électronique (m^{-3})	10^{22}	10^{17}
densité atomique (m^{-3})	10^{24}	10^{22}
fréquence de collision e/a (s^{-1})	10^{12}	10^9
phase du plasma	ETL	Non-ETL
densité de puissance (Wm^{-3})	10^7	10^2
Luminance (Cdm^{-2})	10^6	10^3
pertes thermiques	fortes	faibles

Dans le cas des lampes haute pression, les densités sont telles que les chocs entre particules répartissent l'énergie de façon quasi égale entre toutes les particules. En chaque point du système, une seule température suffit à caractériser les propriétés du système (à l'exception notable de

rayonnement), on dit que le système est à l'équilibre thermodynamique local. La température de toutes les particules est très élevée au centre, de l'ordre de 4000 à 6000K, au bord elle doit être limitée à 900 ou 1400K selon la nature des enveloppes. Ce gradient important de température entraîne des pertes thermiques importantes et un échauffement de l'environnement de la lampe. Les densités de particules étant importantes, les densités de puissances électriques et de puissance rayonnée le sont également. De telles sources peuvent fournir un flux important sous un volume réduit.

A froid, ces lampes sont généralement plus difficiles à amorcer que les lampes basse pression et il faut pour la plupart d'entre elles utiliser des dispositifs d'amorçage électroniques. Par ailleurs elles demandent un certain temps (5 minutes environ) pour atteindre leur température et leur pression de fonctionnement nominales. Si une coupure de courant les éteint à chaud, il faudra attendre leur refroidissement (total ou partiel) avant de pouvoir les remettre en marche.

La situation est très différente en basse pression où les électrons sont beaucoup plus énergétiques que les particules lourdes, ions et atomes. Les chocs électrons-neutres étant moins fréquents les particules neutres restent à une température plus basse, 300 à 500K, les pertes thermiques sont faibles et les enveloppes restent relativement froides. A des densités particulières faibles correspondent des densités de puissance électrique et rayonnée limitées. Le nombre de foyers nécessaires pour obtenir un flux donné sera plus important (d'un facteur voisin de 10 dans la majorité des cas). La puissance volumique étant faible, le temps de mise en régime sera de quelques minutes. Par contre ces lampes restent froides elles ne posent pas de difficultés de ré-allumage.

Pour les lampes haute pression et plus encore pour les lampes basse pression, la nature du rayonnement émis dépend beaucoup de la composition du mélange gazeux utilisé et de la façon dont ce mélange est excité. Nous détaillerons un peu plus ces mécanismes dans le paragraphe suivant.

Il faut également signaler les caractéristiques électriques très particulières des lampes à décharge qui nécessitent toutes, une impédance série pour limiter le courant à sa valeur nominale. Cette impédance série est généralement une self ou une inductance de fuite, l'auxiliaire d'alimentation portant le nom de ballast.

Principales familles de lampes à décharge et leurs propriétés

La figure 5 résume les propriétés des principales familles de lampes à décharge. On y a

également rappelé, dans la première colonne, les propriétés des lampes à incandescence.

La deuxième colonne concerne les lampes fluorescentes, très utilisées dans le tertiaire. Ce sont des lampes basse pression contenant un gaz rare (argon, krypton) sous une pression de 1 à 5 torr et une goutte de mercure qui en s'évaporant partiellement produira une pression de vapeur saturante qui dépendra de la température du mercure liquide et donc de l'environnement thermique de la lampe. La vapeur de mercure (plus facilement ionisable) sera pratiquement seule ionisée et excitée et la décharge produira avec une très bonne efficacité (50 à 60%) un rayonnement de résonance ultraviolet intense, essentiellement à 253,7nm.

Ce rayonnement peut être utilisé directement, pour le traitement de l'air ou de l'eau par exemple, si l'enveloppe est en silice. Si l'on veut produire de la lumière, on utilisera un tube de verre que l'on tapissera de luminophores. Ceux-ci transformeront les photons UV en photons visibles. Compte tenu en particulier des énergies relatives des photons UV et visibles, cette transformation entraîne des pertes thermiques très importantes (de l'ordre de 60%). Globalement, la puissance visible rayonnée représente environ 25% de la puissance électrique. Bien que faible, cette valeur conduit à une efficacité lumineuse de l'ordre de 95lm/W pour une lampe linéaire de 36W. En réalité, cette valeur dépend beaucoup de la qualité chromatique du rayonnement. En effet, si l'on désire une forte efficacité on choisira des luminophores qui n'émettent que près du maximum de sensibilité des trois types de cônes, dans ces conditions l'efficacité lumineuse sera effectivement de 95lm/W et un indice de rendu des couleurs de 85. Si on désire un indice de rendu des couleurs supérieur, 95 par exemple, il faudra étaler le spectre ce qui réduira l'efficacité lumineuse à une valeur de 63lm/W.

Ce compromis entre efficacité et rendu des couleurs, mis en évidence dans le cas des lampes fluorescentes, se retrouve à travers des mécanismes différents, pour toutes les lampes à décharge.

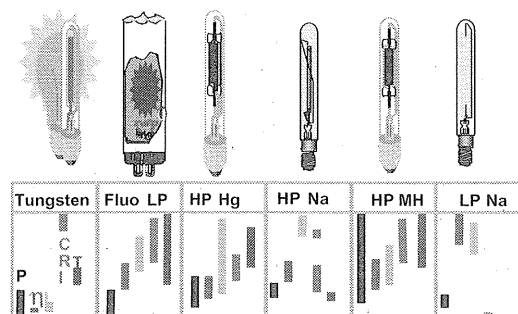


Figure 5: Caractéristiques de lampes (puissance 0-3kW, efficacité 0-200 lm/W, durée de vie 0-

15000h, IRC 0-100, T_{cp} 0-6000K) pour l'incandescence (tungstène), basse pression (LP) et haute pression (HP)

Les lampes fluorescentes linéaires présentent un encombrement important et sont très éloignées d'une source ponctuelle recherchée dans de nombreuses applications. On a cherché à augmenter la densité de puissance pour aboutir à ce que l'on appelle les lampes fluorescentes compactes. On passe ainsi d'une densité d'émission de 7lm/cm³ pour une lampe linéaire de 36W à une densité d'émission de 20lm/cm³ pour une lampe compacte. Cette augmentation de la densité d'émission n'est malheureusement obtenue qu'avec une diminution de l'efficacité lumineuse, de 95 à 82 lm/W dans l'exemple choisi.

La possibilité de modifier la puissance en jouant sur la géométrie de la décharge et l'émission, en modifiant la composition des luminophores, fait que cette famille de lampes offre un choix très large de caractéristiques tant du point de vue de la puissance, que de l'encombrement ou des propriétés radiatives.

La double transformation énergie électrique-rayonnement UV puis rayonnement UV-rayonnement visible réduit fortement l'efficacité globale. On a très tôt pensé à remplacer le mercure par du sodium qui possède deux raies de résonances proches de 590nm, donc près du maximum de sensibilité de l'oeil. La conversion est très efficace puisque l'on obtient jusqu'à 198 l/W mais l'émission pratiquement monochromatique ne permet pas la vision des couleurs, réservant cette famille de lampes (colonne 6) à des emplois très particuliers, éclairage de certaines routes, d'entrepôts...

La constitution de cette lampe est un très bon exemple d'isolation thermique dictée par la nécessité d'obtenir une température de 250°C, nécessaire à la vaporisation du sodium, avec une puissance thermique aussi faible que possible.

La première lampe haute pression commercialisée est la lampe mercure haute pression qui a été développée au début des années 30. Elle a été, jusqu'à l'apparition des lampes sodium haute pression et des lampes à halogénures métalliques dans les années 60, la seule lampe haute pression pratiquement utilisable en éclairage.

La lampe mercure haute pression résulte du fait que, lorsque la densité des atomes de mercure augmente, le rayonnement ultraviolet à 253,7nm est fortement absorbé et l'émission se déplace vers le proche ultra violet et le visible entre 350nm et 590nm. Cette décharge n'émettant pas de rouge on utilise le rayonnement ultraviolet autour de 350nm pour exciter un luminophore "rouge" déposé sur l'ampoule extérieure ou ballon fluorescent.

Dans cette lampe qui fonctionne à des pressions comprises entre 1 et 5 bars, la densité d'émission est de l'ordre de 1100 l/cm^3 pour une lampe de 400W qui émet 22000 lm . Les propriétés de cette source sont par ailleurs assez limitées puisque son efficacité est limitée à 55 lm/W et son indice de rendu des couleurs à 60. Emettant une lumière blanche à bon marché, facile d'emploi puisqu'elle s'amorce sans circuit auxiliaire, elle reste employée en particulier dans l'éclairage des bâtiments industriels et en éclairage public.

La lampe mercure haute pression a rapidement été détrônée, trop complètement peut être, par la lampe sodium haute pression (colonne 4) dont l'efficacité peut atteindre 130 lm/W . Dans cette lampe on vaporise un amalgame de sodium et les propriétés d'émission dépendent assez largement de la pression de sodium présente dans le tube à décharge. L'intérêt d'utiliser la vapeur de sodium à haute pression résulte des propriétés d'élargissement de la raie sous l'effet des interactions résonantes entre atomes de sodium. Cet élargissement étend fortement l'émission du sodium vers le rouge, donnant à la lumière émise cette teinte dorée caractéristique du sodium haute pression. L'indice de rendu des couleurs dépend également de la pression de sodium comme le montre le tableau II

Tableau II: indice de rendu des couleurs (IRC), Température de couleur (T_{CP}), efficacité lumineuse (η) et pression estimée de vapeur de sodium pour différents types de LSHP400W

Type	Sodium blanc	IRC renforcé	η renforcée	Standard
IRC	85	65	25	25
T_{cp} (K)	2500	2150	1950	1950
η (lm/W)	64	95	137	120
PNa (kP)	60	33	23	23

La lampe sodium haute pression (LSHP) est principalement utilisée en éclairage urbain et routier. On la trouve également dans certaines installations industrielles.

Aucunes des lampes haute pression citées jusqu'à maintenant ne peut répondre à la nécessité d'un rendu de couleur de très bonne qualité, par exemple pour la télévision couleur, le contrôle de

qualité, la mise en valeur de certains sites. Il faut alors se tourner vers une famille de lampes apparues dans les années 60-70 : les lampes à halogénures métalliques. Le principe de fonctionnement consiste à introduire dans la décharge des composés halogénés volatils, généralement des iodures, qui, une fois dissociés dans la zone chaude de la décharge, libèrent les métaux qu'ils contiennent. Ces métaux peuvent alors rayonner sans interagir avec l'enveloppe. On obtient ainsi de bien meilleurs résultats chromatiques (IRC 80-95) avec des efficacités intéressantes ($100-80 \text{ lm/W}$). Il faut cependant noter que le fonctionnement très complexe de ces lampes peut conduire à des dérives de couleurs en fin de vie ce qui amène à limiter leur durée de vie pratique à 4-6000h. Ces lampes, d'abord réalisées en silice, le sont de plus en plus en utilisant un tube à décharge céramique. Cette dernière fabrication autorise des températures de fonctionnement plus élevées et des vieillissements mieux contrôlés.

Ces lampes, d'abord conçues pour l'éclairage des enceintes sportives sont également utilisées à chaque fois qu'un bon rendu de couleur est nécessaire.

Impact économique et environnemental des lampes

Aujourd'hui, on estime à 7,5 milliards le nombre de lampes électriques qui fonctionnent sur terre. L'industrie mondiale des lampes produit chaque année plus de 1,5 milliards de lampes d'une valeur ajoutée supérieure à 10 milliards d'euros (1998). C'est ainsi que l'industrie japonaise qui représente aujourd'hui 20 % du marché mondial a enregistré durant les cinq dernières années une hausse de sa production de 3-8 % par an et une augmentation annuelle des ventes de 9.7 % (en moyenne sur les dix dernières années).

Ces lampes fonctionnent en consommant plus de 1000 TWh d'énergie électrique par an. Cette quantité représente approximativement le dixième la production globale d'électricité de notre planète. Si dans un pays industrialisé, comme la France, on utilise en moyenne 10-15 % de la production électrique annuelle pour l'éclairage (plus de 20 % aux USA...), dans un pays en voie de développement cette proportion augmente rapidement (i.e. 37 % pour la Tunisie). Cet important écart est essentiellement lié au fait que dans un pays en voie de développement l'éclairage est une nécessité première. Mais il est également lié à l'utilisation de lampes "bon marché" (lampes à incandescence) ayant une faible efficacité (généralement moins de 10 lm/W en pratique).

Une étude récente a démontré qu'au Royaume Uni, 40 % d'énergie électrique consommée par le secteur tertiaire (surfaces

commerciales, bureaux...) est utilisée pour l'éclairage des bâtiments. Ce pourcentage doit être majoré d'une consommation additionnelle liée aux climatiseurs qui sont chargés d'évacuer la chaleur produite par les lampes (5-7 % d'énergie électrique primaire).

La production de l'énergie électrique pour satisfaire les besoins en éclairage de l'Homme entraîne inévitablement une pollution de l'environnement. Ainsi, on estime que chaque année quelques 550 millions de tonnes de CO₂ accompagnent cette production d'énergie en contribuant à l'effet de serre. Par la même occasion, d'autres substances toxiques sont également produites, le tableau suivant donne quelques estimations pour deux types de lampes produisant la même quantité de lumière (en lumens).

Les lampes contiennent des matériaux rares et souvent toxiques (Hg, Cd, terres rares...). Ainsi, à la fin de vie de la lampe, ces matériaux peuvent être déversés dans la nature. Par exemple, la plupart des lampes, à l'exception des ampoules à incandescence, contiennent du mercure. C'est ainsi, qu'aux USA pour produire chaque année quelque 750 millions de nouveaux tubes fluorescents on utilise 2,5 tonnes de mercure et dans d'autre pays comme la France on collecte par an approximativement 80 tonnes des déchets contaminés par le mercure. Actuellement, selon la nouvelle réglementation européenne, entrée en vigueur le 1/1/98, les lampes à décharge en fin de vie constituent des déchets "ultimes" qui doivent être traités avant stockage dans des décharges spéciales (classe A). Il faut noter que le stockage dans une décharge de ce type coûte approximativement 1000 FFR par tonne.

Des défis pour demain ?

Le premier de ces défis consiste en l'augmentation de l'efficacité lumineuse des sources et plus généralement des "systèmes source" c'est à dire de l'ensemble alimentation-source-luminaire-gestionnaire d'éclairage. L'augmentation de l'efficacité du système, ne fût-ce que de quelques pour cent, constitue un pari important. Des estimations diverses indiquent que compte tenu l'augmentation de la demande de l'humanité pour l'éclairage, en utilisant des sources plus efficaces nous pourrions économiser entre 10 et 15 % de l'énergie consommée pour l'éclairage dans les 10 années à venir. Il faut aussi rappeler que l'augmentation de l'efficacité entraînerait une diminution appréciable de la pollution de l'environnement du fait de la diminution de la production d'énergie nécessaire à l'alimentation de ces lampes. Dans l'état actuel des choses, une augmentation de 2 % de l'efficacité énergétique entraînerait une diminution de 6-7 millions de tonnes dans la réjection du CO₂ dans l'atmosphère

ce qui correspond à 1 % de la diminution prévue par les accords de Kyoto sur l'environnement.

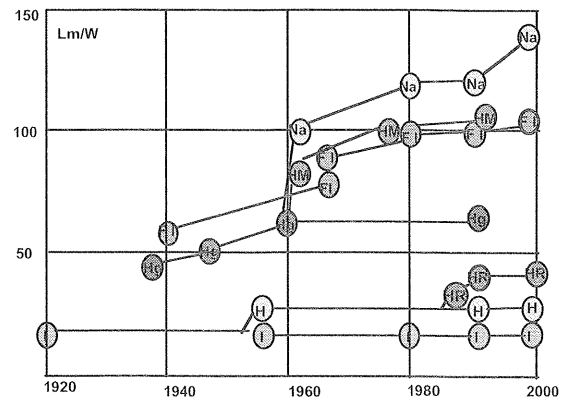


Figure 6: Evolution des efficacités lumineuses des sources. Na sodium haute pression, HM halogénures métalliques, FI fluorescence, HR incandescence halogène à réflecteur, H incandescence halogène, I incandescence ordinaire

Actuellement, malgré tous les progrès de la science et de la technologie dans le domaine des lampes, l'efficacité maximale de ces systèmes stagne, depuis les années 70, autour de 100-140 lm/W (Figure 6). L'industrie des lampes se heurterait-elle à un plafond thermodynamique ou autre? C'est la question qui se pose. Quelle est tout d'abord et sous quelle forme la puissance rayonnante à produire pour obtenir une lumière blanche de qualité convenable? Une première réponse possible est de chercher à produire un mélange blanc de bleu et de jaune. Une telle solution ne permettrait certainement pas d'obtenir un rendu de couleur

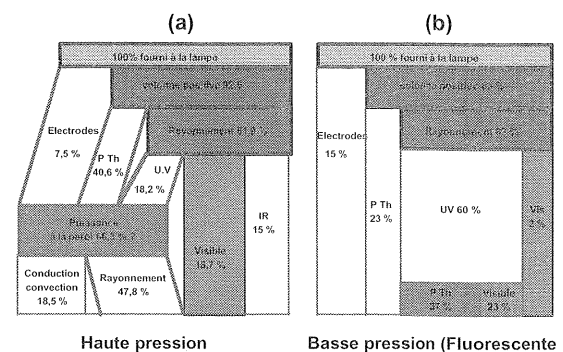


Figure 7: Bilans de puissance pour une lampe mercure haute pression (a) et pour une lampe fluorescente (b).

convenable sur toute l'échelle des teintes. On se dirige alors vers un mélange ternaire, -bleu vert rouge-, du type de celui de la figure 4, dont on sait qu'il conduit à des lumières blanches pratiquement utilisables. Calculons l'efficacité lumineuse du rayonnement d'une lampe qui n'émettrait que ces

trois rayonnements avec une intensité correspondante à 30% de celle du corps noir à 5000 K, ce qui est une estimation raisonnable. Avec des émissions respectivement centrées sur 470nm, 540nm, 630nm, on obtient 340lm/W environ pour l'efficacité du rayonnement. Or des lampes basées sur ce principe existent (lampes tri-iodures dans la famille des lampes haute pression, lampes 3 bandes dans la famille des lampes fluorescente) mais leur efficacité est plus de trois fois inférieure à la valeur calculée ici. Quelles sont les raisons de cette différence, où se situent les principales difficultés? Une première réponse est donnée par la figure 7 qui

donne les bilans de puissance obtenus pour une lampe fluorescente et pour une lampe mercure haute pression. On constate immédiatement deux causes importantes de pertes, les pertes thermiques dans le cas de la lampe haute pression, la conversion UV-visible dans le cas de la lampe fluorescente. Peut-on espérer obtenir une conversion multi-photonique efficace et améliorer les lampes fluorescentes, est-il possible, comme dans les lampes flash, de réduire les pertes thermiques? Pourra t'on réduire ces pertes ou faut-il chercher d'autres modes de conversion? L'avenir, sans doute, le dira.

Références

- Cayless, M.A., A.M. Marsden, *Lamps and Lighting*, Edward Arnold Pub., London, 1983.
Chang, P.Y., W. Shyy, K.T. Dakin, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **33**, 483, 1990.
Damelincourt, J.J., *L'arc électrique et ses applications*, **2**, 217, Ed. CNRS, Paris 1985.
Elenbaas, W., *The high pressure mercury vapor discharge*, North Holland Pub., Amsterdam, 1951
de Groot, J.J., J.A.J.M. van Vliet, *J. Phys. D*, **8**, 653, 1975.
Kenty, C., *J. Appl. Phys.* **21**, 1309, 1950.
Koedam, M., A.A. Kruithof, J. Riemens, *Physica*, **29**, 565, 1963.
Verweij, W. *Philips Res. Rep. Sup.*, **2**, 1, 1961.
Vriens, L. R.A.J. Keijser, A.S. Ligthart, *J. Appl. Phys.*, **49**, 3907, 1978.
Waymouth, J., *Electric Discharge Lamps*, The M.I.T. press, Cambridge, 1971.

COURANTS HARMONIQUES EMIS PAR LES LAMPES A DECHARGE INTERACTIONS AVEC LE RESEAU

Eric ROAUX
Expert AFE

Résumé. Cet article présente tout d'abord, le fonctionnement électrique d'une lampe à décharge et explique pourquoi celui-ci entraîne inévitablement la production de courants harmoniques.

A l'aide d'études de cas, nous analysons ensuite la norme internationale EN 61000-3-2 et son dernier amendement relatif à l'émission des courants des lampes à décharge de petites puissances ($P < 25W$).

Nous traitons enfin des problèmes liés à l'utilisation des lampes à décharge et plus spécialement les phénomènes de résonance des circuits d'éclairage.

I - INTRODUCTION

L'arrivée massive de l'électronique de puissance pose de plus en plus de problèmes relatifs à la pollution harmonique des réseaux d'alimentation. En effet, il n'est pas rare aujourd'hui de mesurer des taux d'harmoniques globaux (THD) de 3 à 4 % sur la tension, ce qui entraîne souvent l'apparition de courants de même fréquence venant renforcer le niveau de ceux produits par le système lui-même.

Cette pollution a pour origine des courants non sinusoïdaux absorbés par des équipements tels que télévision, radio, matériel informatique, électroménager, éclairage compact fluorescent dans le secteur domestique. Le domaine industriel n'est naturellement pas épargné avec le développement de nouveaux processus, mettant en jeu des puissances importantes, tels que les fours à induction, les torches à plasma et les fours à arc; signalons également l'éclairage utilisant les lampes à décharge, objet de cet article.

Si la pollution engendrée par l'électronique de puissance, notamment les alimentations à découpage, est relativement récente, celle produite par les lampes à décharge remonte aux années 30 avec l'apparition sur le marché des lampes basse pression à vapeur de sodium (1931) puis des lampes haute pression mercure (1934) et ensuite les tubes fluorescents (1938).

II - LES LAMPES A DECHARGE

Pour qu'une décharge électrique dans un gaz ou une vapeur métallique soit autonome, c'est à dire se maintienne d'elle-même, le nombre de particules chargées produites par unité de temps doit être au moins égal au nombre de particules chargées qui se recombinent pendant le même temps - par exemple, par accroissement exponentiel du nombre d'électrons

créés par ionisations successives du gaz. Ce processus d'avalanche conduit à une caractéristique tension-courant négative (figure 1a).

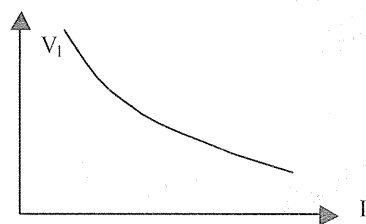


Figure 1a

La décharge est instable : le tube sera détruit si la décharge n'est pas stabilisée par une impédance en série dans le circuit (première conséquence de la caractéristique $u = f(i)$ - figure 1b).

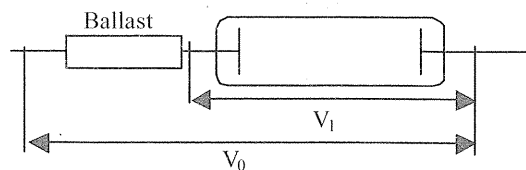


Figure 1b

Le choix d'une inductance, dans le cas des réseaux alternatifs 50 Hz, semble être la meilleure solution; en effet, l'utilisation d'un condensateur comme ballast, génère des pics de courant qui ont des conséquences défavorables pour la durée de vie des lampes. Quant à la résistance pure, elle a le désavantage de consommer une puissance active du même ordre que celle de la lampe.

La deuxième conséquence d'une caractéristique tension-courant négative est la forme particulière prise par la tension aux bornes du brûleur - appelée tension d'arc -. La figure 1c présente la construction de la tension d'arc à partir de la caractéristique tension-

courant de la lampe d'une part, et une demi-période sinusoïdale du courant alternatif d'autre part.

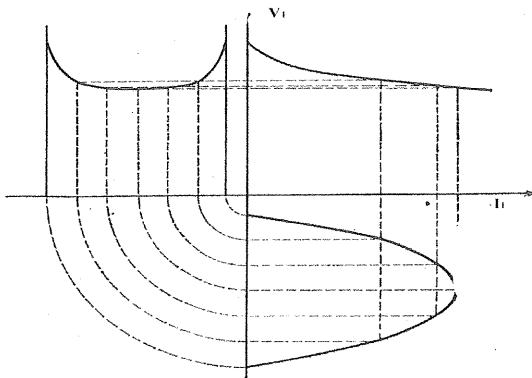


Figure 1c

Cette déformation de la tension d'arc est d'autant plus marquée que la fréquence est faible. La figure 2 présente les oscillogrammes relevés sur un tube fluorescent TLD 30 W - [1] -

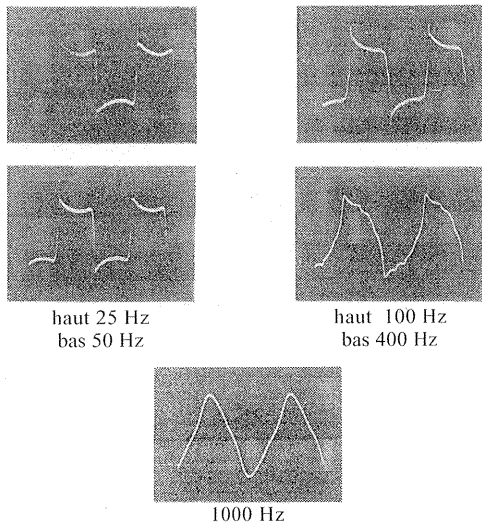


Figure 2
Oscillogrammes de la tension d'arc relevés sur un tube fluorescent TLD 30 W.

III - MODELISATION DE LA TENSION D'ARC

Considérons un réseau basse fréquence (50 Hz) sinusoïdal de tension V_0 (fig. 1b) et une tension d'arc assimilée à des créneaux d'amplitude V_1 .

Elenbaas et Dorgelo [1] en déduisent :

$$V_0^2 = (L\omega I_1)^2 + (1,09 V_1)^2$$

avec I_1 : courant lampe, $L\omega$: impédance du ballast. Le facteur de déphasage (entre V_0 et I_1) est égal à :

$$\cos \varphi = \frac{1,11 V_1}{V_0}$$

Le facteur de puissance est égal à :

$$\lambda = 0,9 \frac{V_1}{V_0} = 0,81 \cos \varphi$$

En utilisant la décomposition de V_1 en série de Fourier, on obtient :

$$I_{1n} = \frac{\sqrt{2V_0^2 - \left(\frac{4V_1}{\pi}\right)^2}}{L\omega}$$

et $I_n = \frac{4V_1}{\pi n^2 L\omega}$ avec $n=3,5,7,\dots$

(dans le cas de signaux alternatifs seuls les rangs impairs sont à considérer).

Pour $V_1 = 0,5 V_0$, ce qui est toujours sensiblement le cas, on a :

$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{51}{n^2} \text{ en \%}$$

En appliquant cette équation à un cas concret pour un tube de 36 W (figures 3a et 3b) on obtient un bon accord entre les courants harmoniques calculés et mesurés (fig.4).

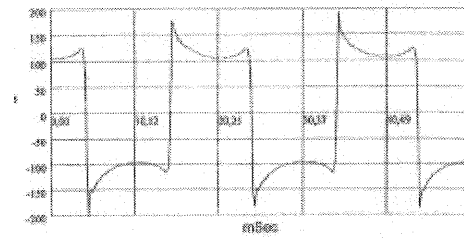


figure 3a : tension

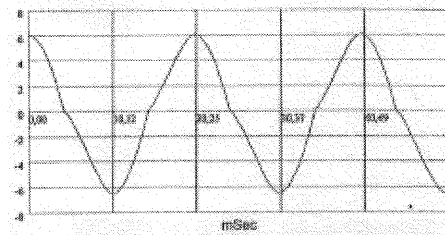


figure 3b : courant

Figures 3
Tube fluorescent 36 W, ballast électromagnétique

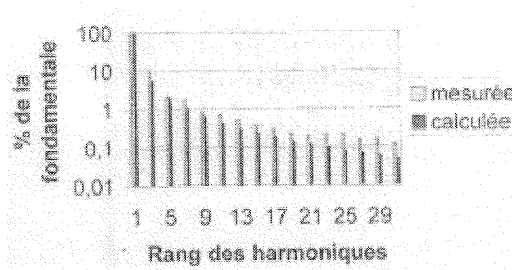


Figure 4

NORMES EN 61000 - 3 - 2 .

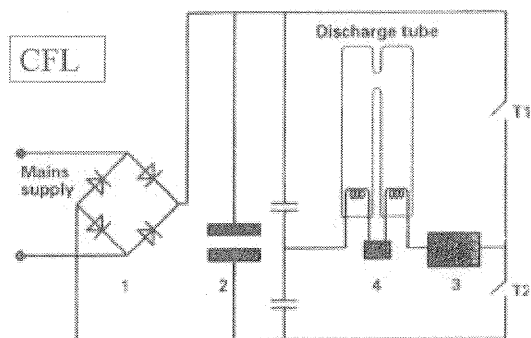
La norme EN 61000 - 3 - 2 qui fait partie des normes relatives à la CEM (Compatibilité Electromagnétique) est le document qui prescrit les limites des courants harmoniques des appareils dont le courant efficace est inférieur à 16 A par phase. Pour les appareils d'éclairage dont la puissance absorbée est supérieure ou égale à 25 W, les limites sont les suivantes :

rang n	2	3	5	7	9	$11 \leq n \leq 39$
I_n	2	$30/\lambda$	10	7	5	3

- I_n = valeur maximale du courant harmonique de rang n en % du courant fondamental.

- λ = facteur de puissance

Pour les puissances inférieures à 25 W, il n'y avait jusqu'à présent aucune norme. Un amendement à la norme EN 61 000-3-2 applicable au 1^{er} janvier 2001, concernera cette catégorie de lampes dont font partie les lampes CFL (compactes fluorescentes) dites à économie d'énergie (pour un même flux lumineux, une lampe CFL consomme 4 à 5 fois moins d'énergie qu'une lampe à incandescence). Les lampes CFL sont stabilisées à l'aide d'un ballast électronique non filtré (figure 5).



1 : pont redresseur ; 2 : capacité de charge
3 : ballast ; 4 : chauffage des cathodes

Figure 5

Contrairement aux ballasts électroniques pour tubes fluorescents qui sont équipés d'un filtre passe-bas classique composé d'une inductance en série et d'un condensateur en parallèle, la lampe CFL n'est pas filtrée pour plusieurs raisons : tout d'abord économique (coût plus élevé, alors que la norme ne l'exigeait pas jusqu'à présent), ensuite technique (la durée de vie de la lampe s'en trouve réduite, principalement à cause du condensateur fonctionnant à température élevée) et enfin esthétique (augmentation du volume réservé à l'électronique).

Le législateur, sensible à ces arguments a rédigé l'amendement en donnant aux constructeurs le choix entre deux options aboutissant à des solutions techniques différentes :

- 1) les courants harmoniques ne doivent pas dépasser les valeurs du tableau suivant :

rang n	3	5	7	9	11	$13 \leq n \leq 39$
I_{max} en mA/W	3,4	1,9	1,0	0,5	0,35	$3,85/n$

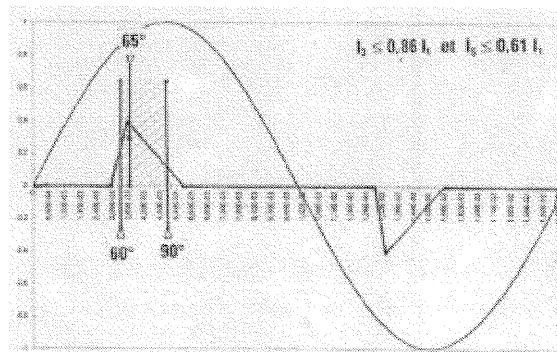
- 2) ou bien, les courants harmoniques doivent répondre aux conditions suivantes :

- l'harmonique de rang 3 doit être inférieure ou égale à 86% du courant fondamental;

- l'harmonique de rang 5 doit être inférieure ou égale à 61% du courant fondamental;

- le courant doit prendre une valeur avant 60°, avoir son maximum avant 65°, et ne pas s'arrêter avant 90°. Les angles sont mesurés à partir du passage par 0 de la tension fondamentale d'alimentation.

La figure 6 représente l'enveloppe dans laquelle l'impulsion de courant de la lampe CFL doit s'inscrire.



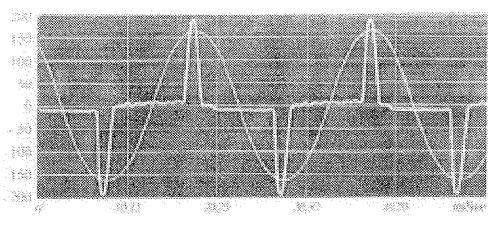
Limites du courant absorbé par une CFL (25W)

Figure 6

Pourquoi cette exigence sur la forme et la phase des pics de courant ?

- pour compenser partiellement la pollution domestique apportée notamment par les récepteurs de télévision, en évitant que les courants impulsionnels des postes TV et des lampes CFL ne s'additionnent. Voyons l'efficacité de cette compensation dans l'exemple suivant :

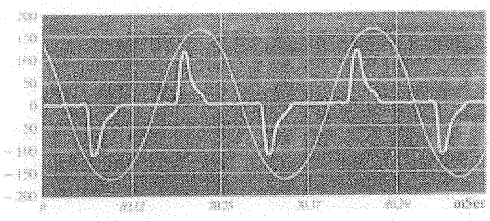
Soit un poste de télévision d'une puissance de 81W dont le courant est représenté figure 7a.



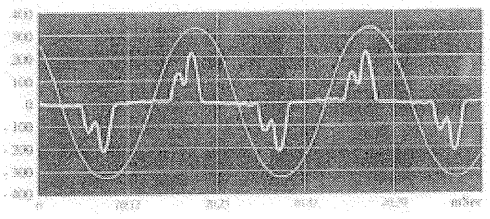
Courant absorbé par un téléviseur de puissance 81 W.

Figure 7a

Quatre lampes CFL d'une puissance totale de 55W répondant à la future norme EN 61 000-3-2 (figure 7b) sont branchées avec le poste TV sur le réseau 230V (figure 7c).



Courant absorbé par quatre lampes CFL d'une puissance totale 55 W.
Figure 7b



Courant total absorbé téléviseur et lampes
Figure 7c

Le tableau (figure 8) donne les valeurs du facteur de puissance :

- [A] du poste TV seul : 0,57
- [B] des lampes seules : 0,61
- [C] de l'ensemble poste – CFL : 0,71

	P W	I mA	PF	THD %	I ₁	φ ₁	I ₃	φ ₃	I ₅	φ ₅	I ₇	φ ₇
A	81	593	0,57	136	351	13	300	171 (-)	250	16	199	159 (-)
B	55	382	0,61	110	257	27	205	100 (-)	135	145	92	44
C	136	796	0,71	86	601	19	404	141	196	52	115	172

Figure 8

Le facteur de puissance s'est amélioré grâce à la neutralisation des courants harmoniques de rang 5 et 7.

V - PROBLEMES RENCONTRES DANS LES INSTALLATIONS D'ECLAIRAGE.

V-1- Courant dans le neutre.

Lorsqu'une installation d'éclairage est alimentée sur un réseau triphasé en étoile, la section du conducteur neutre doit être la même que celle des conducteurs de phase (norme C 15-100). Si cette norme n'est pas appliquée, le risque de surchauffe du conducteur neutre est grand, même si le circuit est parfaitement équilibré. En effet, on sait que le courant dans le neutre est la somme des courants homopolaires circulant dans les phases (rangs 3, 9, 15...). Si l'on se réfère à la norme EN 61 000-3-2 sur la limite des courants harmoniques de rang 3 (I₃ = 0,30 I_n, avec λ = 1), le courant dans le neutre à 150 Hz peut atteindre 90% du courant de phase.

V-2- Phénomène de résonance des circuits.

Les installations d'éclairage sont en général compensées par des condensateurs branchés en parallèle sur le réseau. Le facteur de déphasage s'en

trouve évidemment amélioré, mais analysons les inconvénients engendrés par un réseau présentant des tensions harmoniques non négligeables :

- le développement de courant harmonique i_h, à partir d'une tension harmonique v_h, présente au niveau du poste d'alimentation, a pour valeur :

$$i_h = v_h \cdot n \cdot C \cdot \omega_h$$

avec :

- n : nombre de luminaires compensés ,
- C : capacité de compensation
- ω_h : pulsation de rang h.

Ce phénomène s'accroît si le circuit LC formé par, d'une part l'inductance L du transformateur d'alimentation HTA/BT, et d'autre part les capacités des luminaires, présente une fréquence de résonance f_r proche de celle d'une tension harmonique du réseau et dont l'amplitude est significative.

On a :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{nCL}}$$

On voit que pour déplacer cette fréquence de résonance f_r, il suffit de changer L ou C. La première solution, la moins coûteuse, est l'optimisation de la capacité C; on sait que l'augmentation de celle-ci va provoquer une amélioration du cos φ mais également, comme nous venons de le voir, une augmentation des courants harmoniques I_h.

La grandeur à contrôler est le facteur de puissance

$$\lambda = \frac{\cos\phi}{\sqrt{1 + THD_1^2}}$$

THD₁: taux global d'harmoniques du courant par rapport à la fondamentale.

$$THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n I_n^2}}{I_1}$$

La deuxième solution est l'insertion d'une inductance série avec le transformateur HTA/BT (2).

Analysons le cas d'une installation triphasée 400V équipée de 13 projecteurs de 1,8 kW par phase. Chaque projecteur est compensé à l'aide d'un condensateur de 60 μF. La figure 9 donne la valeur des courants calculés (sans pollution) et des courants mesurés en fonction du nombre de projecteurs mis en service par phase. Lorsque tous les projecteurs sont allumés, la valeur efficace du courant mesuré est de 200 A (avec un THD-F de 124%), pour une valeur théorique de 120 A s'il n'y avait pas de pollution; signalons que le taux global d'harmoniques relevé sur la tension, à pleine puissance est de 12,6%.

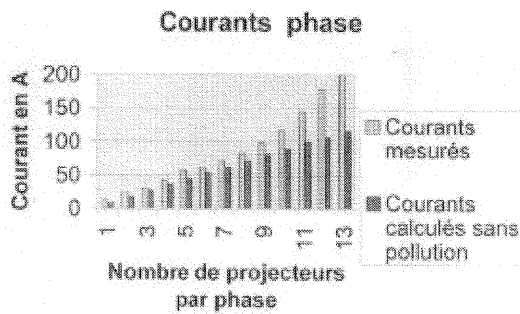


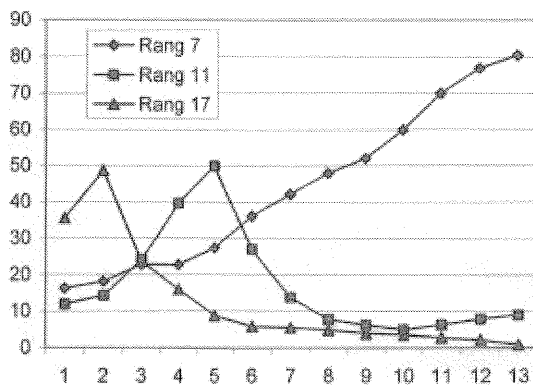
Figure 9

Analysons le spectre des courants harmoniques à pleine charge :

Rang des I_h	1	3	5	7	9	11	13	15	17	21	23	25
% de I_{eff}	56	0.9	16	80	2.9	9.0	5.0	0.9	0.9	0.2	1.0	0.8

On constate que le courant est principalement "pollué" par l'harmonique de rang 7 ($I_7 = 166$ A, pour un courant fondamental de 116 A).

La figure 10 montre clairement la fréquence de résonance du circuit à pleine puissance: $f_r = 350$ Hz, tandis que celle-ci est de 550 Hz et 850 Hz pour respectivement 5 et 2 projecteurs par phase.



THD % de I_{eff} , en fonction du nombre de projecteurs par phase

Figure 10

Il est important de souligner ici que l'accroissement du courant est lié directement au taux d'harmonique de rang 7 de la tension existant à vide.

Le tableau de la figure 11 montre la pollution "naturelle" du réseau en l'absence de projecteur. La pollution est ici exclusivement due à des onduleurs.

	RMS	THD -F %	HRM S	3	5	7	11	13	17	19	23	25	29
U_{12}	394V	3.1	12 V	0.4	1.4	2.2	0.8	0.4	0.6	0.9	0.4	0.2	0.7
U_{21}	395V	2.9	12 V	0.5	1.2	2.1	0.7	0.4	0.5	0.8	0.3	0.4	0.6
U_{31}	394V	3.2	12 V	0.2	1.4	2.2	0.8	0.3	0.7	1	0.3	0.4	0.6

Figure 11

Dans ce cas précis, l'optimisation du nombre de condensateurs de compensation a été efficace (figure 12); si l'on supprime 3 condensateurs par phase ($3 \times 60 \mu F$), le facteur de puissance passe de 0.56 à 0.77 (figure 12). En conséquence, le courant efficace chute de 200 A à 148 A.

Suppression des condensateurs

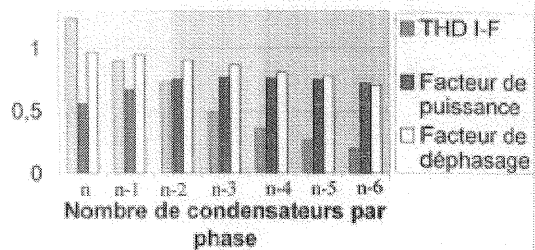


Figure 12

CONCLUSION :

Cet article a tenté de montrer l'importance qu'il faut donner aujourd'hui à l'étude des courants harmoniques en électrotechnique. On ne peut plus confondre le facteur de puissance avec le facteur de déphasage.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1]- W.ELENBAAS
-Fluorescent lamps and lighting.
Philips Technical Library.
- [2]- E. ROAUX, J. LACHAUME
Les harmoniques et leurs conséquences
LUX Sept 95.

ECLAIRAGE ET ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

Patrick SOUILLAC

Lycée technique Pierre Mendès France

88000 Epinal

p.souillac@ac-nancy-metz.fr

Avertissement :

Cet article fait suite à celui paru dans le n° 19 de la REVUE 3EI (c'est pourquoi il commence au paragraphe 4), et traite principalement des lampes au sodium haute pression et des convertisseurs destinés à les alimenter.

1. L'éclairage fluorescent

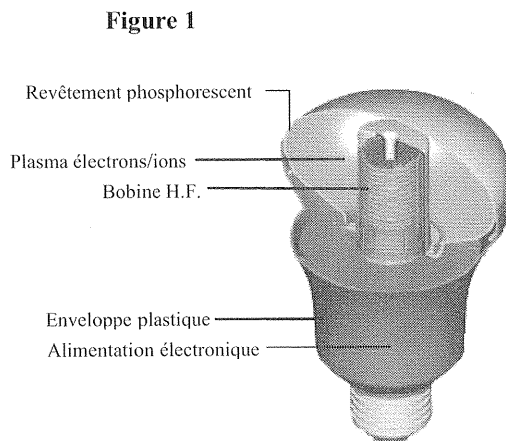
1.1. Principe de fonctionnement de tubes fluorescents (Cf. La Revue 3EI n° 19)

1.2. Amélioration de l'amorçage : utilisation d'un starter électronique (Cf. La Revue 3EI n° 19)

1.3. Ballast électronique (Cf. La Revue 3EI n° 19).

1.4. La lampe à induction : une lampe fluorescente sans électrodes

1.4.1. Schéma de principe (figure 1)



1.4.2. Fonctionnement :

Il est comparable à celui d'un transformateur. Les atomes de mercure présents dans l'ampoule, excités par le champ magnétique alternatif H.F., produisent une émission de lumière ultraviolette qui excite la couche fluorescente qui tapisse l'intérieur de l'ampoule et qui produit la lumière visible.

1.4.3. Caractéristiques, comparaison, évolution.

La Lampe GENURA 23 W de *Général Electric* produit le même niveau d'éclairage qu'une lampe réflecteur à incandescence de 100 W. La chaleur produite est donc moindre ce qui constitue un avantage important pour l'utilisation dans les luminaires. D'autre part sa durée de vie est de l'ordre de 10 000 heures soit 10 fois plus qu'une lampe à incandescence. Enfin l'amorçage est immédiat et en 8 minutes on atteint 80 % du flux lumineux. Des allumages et extinctions fréquents ne posent pas de problème.

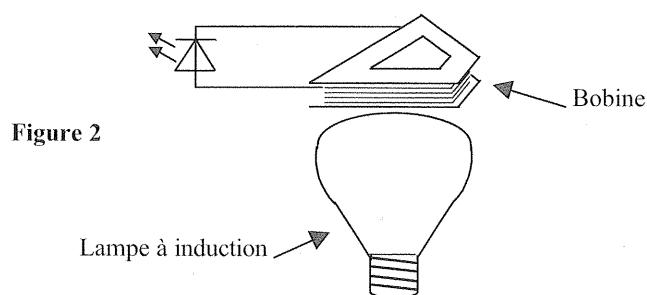
L'éclairage à induction PHILIPS QL est moins compact. Il se compose d'une ampoule, d'un générateur H.F. (dimension 14 x 13 x 4,6 cm) dont la fréquence vaut 2,65 MHz et d'une antenne qui transmet l'énergie du générateur H.F. à un circuit magnétique composé d'une bobine et d'une tige de ferrite située à l'intérieur de l'ampoule. Sa durée de vie est de 60 000 heures, l'allumage est immédiat et on atteint 100 % du flux lumineux en 1 minute. D'autre part, le facteur de puissance est supérieur à 0,9 et le T.H.D. inférieur à 10 %.

OSRAM produit une lampe de forme particulière : l'ENDURA. Le boîtier de commande électronique opère à 250 kHz. La durée de vie est de 60 000 heures, le démarrage immédiat et l'efficacité lumineuse élevée.

L'évolution de ce type de lampes porte principalement sur l'augmentation de puissance comme par exemple les lampes au soufre : système SOLAR 1000 de FUSION LIGHTING, articulé autour d'une décharge micro-onde.

Mise en évidence de l'effet transformateur.

On peut réaliser le montage représenté à la figure 2 :

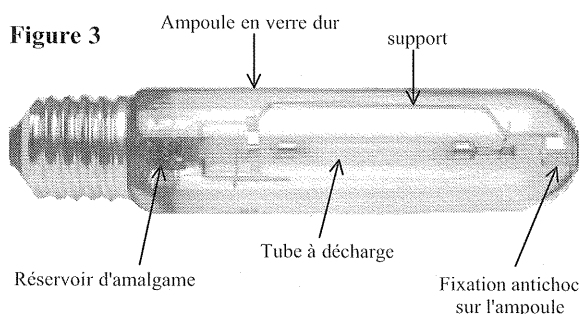


N'importe quel type de bobine peut convenir, par exemple 4 galettes récupérées sur un moteur de lecteur de disquettes montées en parallèle. Compte tenu de la fréquence, du fil de Litz aurait été souhaitable pour minimiser l'effet de peau.

2. Les lampes à vapeur de sodium haute pression

2.1. Présentation

La figure 3 représente une lampe SHP 400 W (Général Electric)

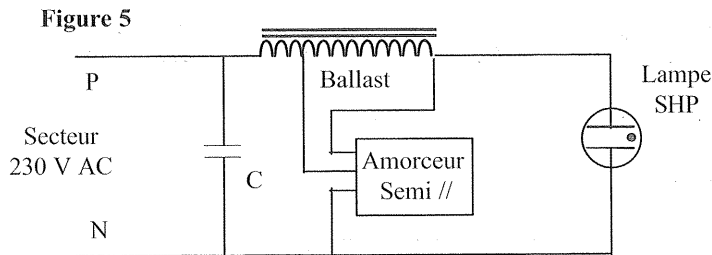


L'ampoule externe, en verre supportant les hautes températures, maintient le tube à décharge à la même température. Elle protège également des ultraviolets qu'elle absorbe. Le tube à décharge supporte 1300° (800° pour les quartz). Il contient l'amalgame sodium-mercure et le xénon. IL résiste à l'attaque corrosive de la vapeur de sodium. Les électrodes, constituées d'une double couche de spires de tungstène, sont imprégnées de substances émissives. Lorsque le xénon est suffisamment ionisé, un arc s'établit entre les deux électrodes. Le xénon stimule le sodium plus fortement et plus longtemps (accélération de la vitesse lors des collisions avec les atomes de xénon) induisant une plus grande efficacité lumineuse, les lampes à vapeur de sodium détiennent dans ce domaine le record absolu : 150 lm/W.

Il existe aussi des lampes basse pression, mais les hautes pressions ($P = 13000$ Pa) permettent de concevoir des lampes à la fois très puissantes et de dimensions réduites.

2.2. Principe de fonctionnement.

Les lampes à décharge génèrent de la lumière grâce à une décharge électrique qui se produit entre 2 électrodes. La tension secteur ne convient pas pour allumer les lampes au sodium haute pression, un amorceur est requis pour amorcer la décharge. Celle-ci va se produire sous l'effet d'impulsions de 1,8 kV à 4,5 kV selon la puissance de la lampe. Le montage type d'une lampe SHP est représenté à la figure 5 ; il comporte toujours les trois éléments suivants : un ballast, un amorceur et un condensateur.

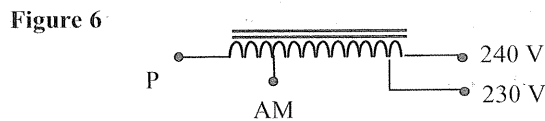


2.3. Etude des différents éléments.

2.3.1. Le ballast

C'est une inductance constituée d'un enroulement de fil de cuivre et d'un circuit magnétique avec entrefer. Il limite le courant fourni à la lampe car celle-ci se comporte comme une impédance négative et il abaisse la tension secteur de 230 V à environ 100 V qui correspond à la valeur de la tension d'arc de la lampe. (Enfin, il est parfois utilisé par le circuit amorceur pour créer la surtension).

On trouve, en général, 4 bornes sur un ballast (figure 6)



La prise 240 V est recommandée pour éviter la suralimentation qui nuit à leur durée de vie. Le ballast doit être dimensionné en fonction de la lampe ; par exemple, pour une lampe de 1000 W, les caractéristiques du ballast sont les suivantes :

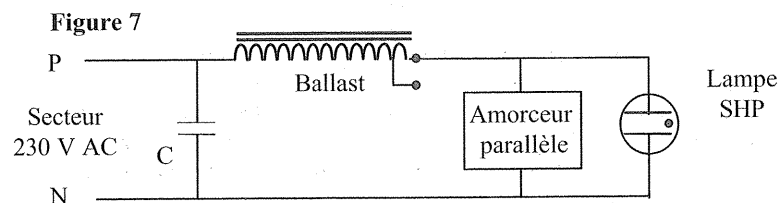
Tension secteur : 240 V ; intensité nominale : 14,4 A

Tension ballast : 198 V, pertes 70 W, poids : 10,8 kg

2.3.2. L'amorceur

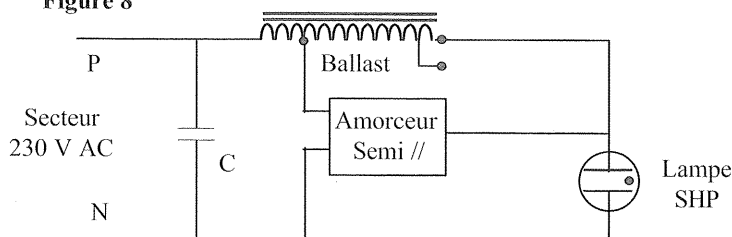
Il va fournir, seul ou avec l'aide du ballast, les impulsions haute tension nécessaires au démarrage de la décharge ; il n'est plus utile par la suite. En simplifiant on peut les classer en deux types : l'amorceur parallèle ou semi-parallèle.

Le schéma de principe de l'amorceur parallèle est représenté à la figure 7, simple à utiliser, il se branche aux bornes de la lampe.



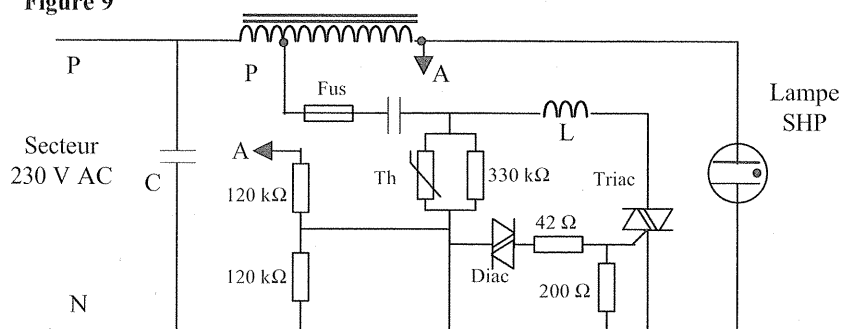
Le schéma de principe de l'amorceur semi-parallèle (figure 8.) montre que ce dernier fonctionne en conjonction avec le ballast, alors doté d'une prise auxiliaire. C'est la solution la plus économique : les amorceurs parallèles et série nécessitant une bobine supplémentaire.

Figure 8



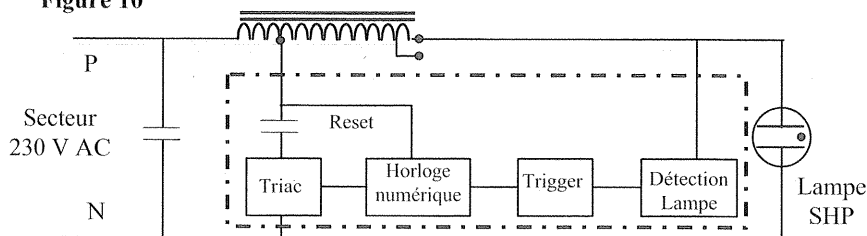
Un exemple de réalisation est représenté figure 9. Lorsque la tension atteint une trentaine de volts aux bornes du diac, il devient passant et déclenche le triac. Le ballast joue le rôle d'autotransformateur et élève la tension aux bornes de la lampe à une valeur convenant à l'amorçage. Une temporisation thermique (échauffement d'une thermistance) fait diminuer progressivement la hauteur des impulsions car l'amorceur fonctionne en permanence. Les impulsions se poursuivent mais restent autour de 600 V, elles ne sont pas définitivement arrêtées dans ce cas.

Figure 9



La figure 10 représente le schéma de principe de l'amorceur semi-parallèle *Super APU* de THORN.

Figure 10



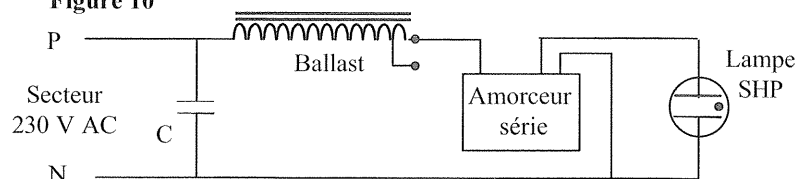
La temporisation numérique, réalisée autour de circuits 4000 et 4521, coupe les impulsions quand l'amorceur fonctionne en permanence (lampe morte ou absente) et empêche le clignotement "cycling" des lampes en fin de vie.

Enfin, Philips commercialise un type d'amorceur appelé parallèle à résonance. Une capacité est utilisée avec le ballast pour créer un circuit résonant avec un facteur de surtension Q élevé. La fréquence de travail est comprise entre 2 et 8 kHz. Une haute tension sinusoïdale est produite que l'on peut supprimer en abaissant Q à l'aide d'une thermistance CTP.

- L'amorceur à superposition ou amorçeur série :

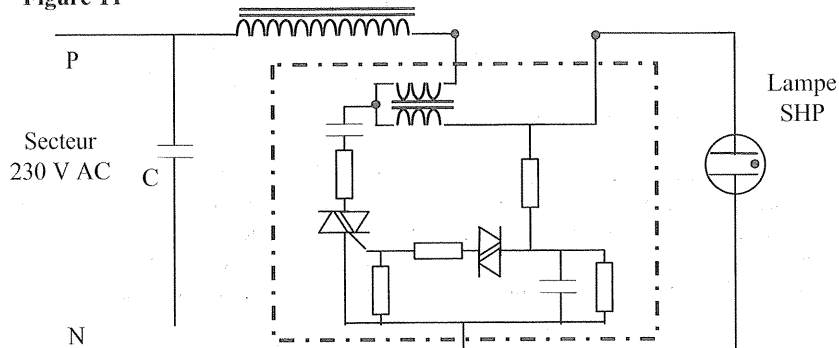
Il est indépendant du ballast. Il génère la haute tension qui est directement appliquée à la lampe (figure 10). Il ne nécessite ni ballast spécial, ni prise auxiliaire.

Figure 10



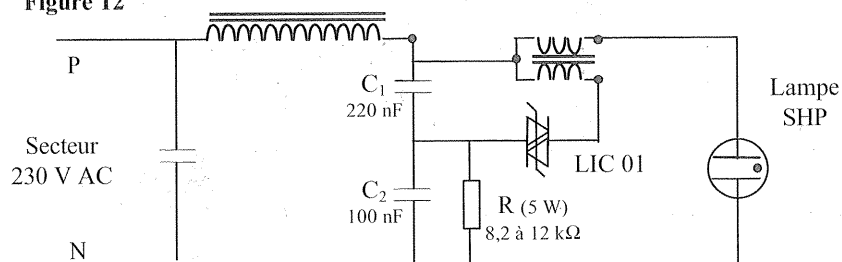
On le réalise en plaçant en série avec le ballast une inductance qui se comporte comme un autotransformateur de rapport de transformation de l'ordre de 20 (figure 11), alimentant un circuit qui génère une impulsion de l'ordre de 3 à 4 kV pour amorcer la lampe.

Figure 11



Philips utilise des composants appelés SIDAC en remplacement de l'ensemble diac, triac; ST Microelectronics propose une solution semi-intégrée (figure 12) utilisant un composant appelé LIC 01 (LIGHT Ignition Circuit), ayant pour schéma fonctionnel :

Figure 12



Quand la tension à travers C1 atteint la tension de déclenchement du circuit LIC 01 celui-ci devient passant et il produit une impulsion haute tension aux bornes de la lampe grâce à l'autotransformateur.

2.3.3. Le condensateur.

Son rôle principal est de remonter le facteur de puissance de l'ensemble lampe et ballast.

3. Alimentation hautes fréquences des lampes sodium haute pression.

Comme pour les tubes et les lampes fluorescentes l'utilisation de structures d'électronique de puissance pour alimenter les lampes sodium haute pression permet d'augmenter l'efficacité lumineuse, de diminuer le papillotement (flickering) ainsi que la masse et le volume de l'ensemble. Cependant certaines plages de fréquence peuvent être la cause de résonance acoustique. Plusieurs structures sont réalisées :

3.1. Montage push-pull

On peut voir (figure 13) l'exemple de montage présenté par P. GOUREAU et P. TOUSSAINT dans *la Revue 3EI* (n° 8, mars 1997 p.45), le circuit de commande des IGBT a également été publié dans la Revue 3EI (n° 9, juin 1997).

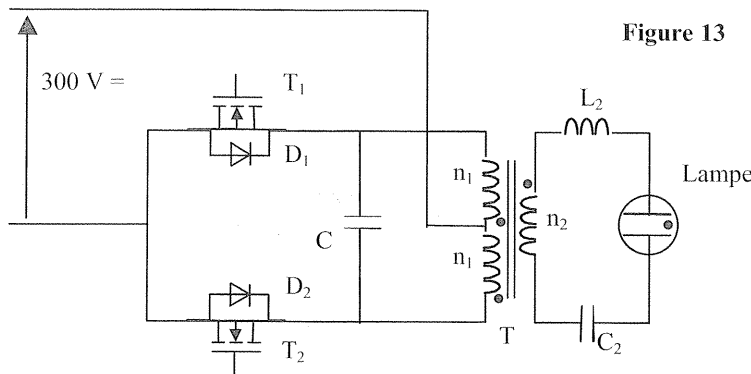


Figure 13

Lampe : SHP 80 W
 D₁, D₂ : BYT 08 PI 1000
 T₁, T₂ : IGBT 20 A / 1000 V
 IXGH25N100A (IXYS)
 n₁ = 47 sp, n₂ = 27 sp
 T : Circuit magnétique
 GER 42 x 21 x 15 N27

3.2. Circuit résonnant auto-oscillant.

Le fonctionnement du circuit résonnant auto-oscillant (figure 14) est identique à celui décrit pour les lampes fluorescentes (Revue 3EI, n° 19, § 3.4).

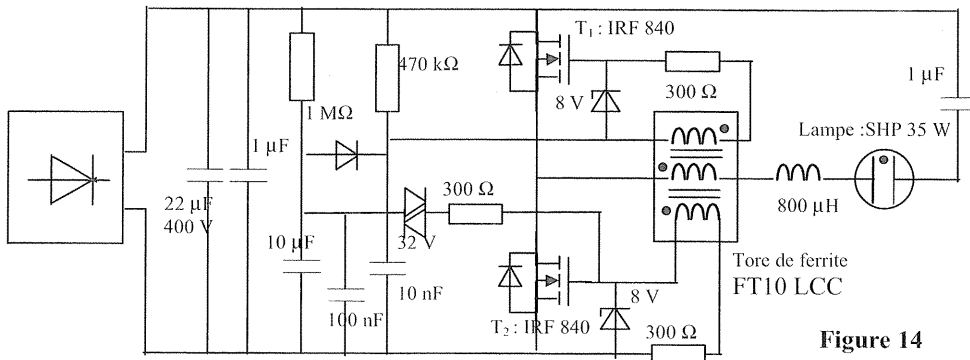


Figure 14

3.3. Montage demi-pont

Sur l'exemple présenté figure 15, l'onduleur résonnant à fréquence contrôlée est doté d'un générateur haute tension pour l'amorçage de la lampe et d'une inductance auxiliaire permettant la commutation au zéro de tension (ZVS).

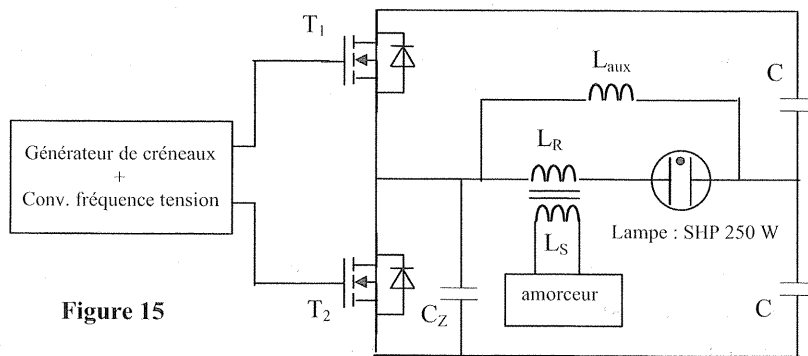


Figure 15

L'amorçeur générant l'impulsion de démarrage de 3 kV est constitué (figure 16) d'un simple circuit LC utilisant le secondaire de l'inductance principale L_R.

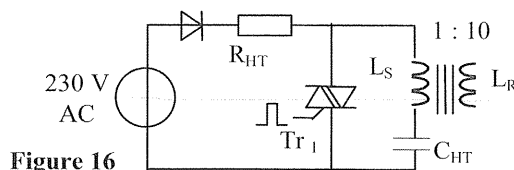


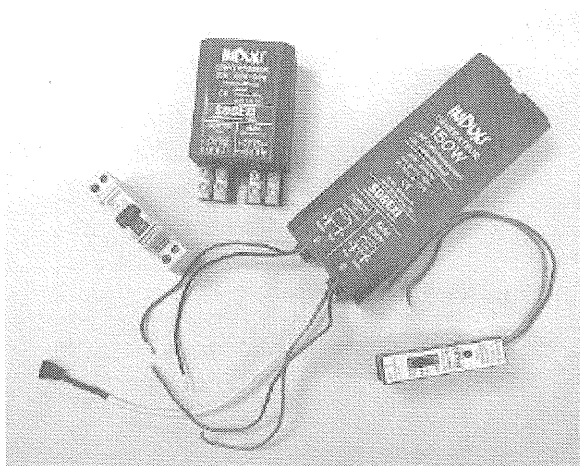
Figure 16

La capacité C_{HT} est chargée à travers R_{HT} . C_{HT} et L_S forment un circuit résonant, quand le triac devient passant C_{HT} se décharge et génère l'impulsion haute tension. Pour fournir 3 kV pendant une microseconde ce qui permet d'assurer l'amorçage dans les cas les plus défavorables, il faut réaliser la condition : $\pi \sqrt{L_S \cdot C_{HT}} > 1 \cdot 10^{-6}$

3.4. Présentation d'une réalisation industrielle.

Le système INDUXI (figure 17) produit par la société SOGEXI pour l'alimentation des lampes d'éclairage public, est destiné à remplacer les platines d'appareillage traditionnelles sur lesquelles il présente de nombreux avantages :

- sécurité : isolation entre la lampe et l'alimentation (IP, Classe 2 – NF 17.200).
- Economie : durée de vie prolongée, 20 % de consommation en moins à 230 V et $\cos \phi = 1$.
- Maintenance facilitée : témoin de maintenance, détection automatique des lampes en fin de vie.



La partie puissance comprend : un redressement avec circuit de correction du facteur de puissance, suivi d'un onduleur générant une fréquence de l'ordre de 80 kHz qui alimente la lampe SHP à travers un transformateur. Chaque module est adapté à une puissance de l'ordre de 100 W, 150 W, 250 W et 400 W. La partie commande gère l'amorçage, la réduction du flux lumineux est possible grâce à un potentiomètre de réglage. La maintenance est facilitée par une LED qui indique soit le fonctionnement normal soit les éventuels défauts : lampe hors service, court circuit fil lampe, fonctionnement en phase d'abaissement. Elle régule le courant en cas d'alimentation anormale (court-circuit, surcharge) et protège le système. Enfin elle est dotée d'un signal d'abaissement qui permet le contrôle de la puissance lumineuse à distance : un module, qui peut être éloigné du système INDUXI, transmet à ce dernier un train de 50 impulsions sur le réseau, s'arrête et recommence toutes les 50 secondes. Tant que le système reçoit ces impulsions, il délivre la puissance définie par le potentiomètre de réglage. En cas d'absence des impulsions pendant plus de 5 minutes le système alimente la lampe à pleine puissance.

Remerciements :

M. TOUSSAINT	ENSEA	Mme LEE	THORN EUROPHANE
M. BAIRANZADE	ON SEMICONDUCTORS	Pr. CHI-HWAN LEE	VIDUK UNIVERSITY
M. CHAPUIS	ST MICROELECTRONICS	M. FITTER	PHILIPS LIGHTING
Mme BRETON	GE LIGHTING	M. ESCAICH	SOGEXI – BEEP
M. DRAMARD	GE LIGHTING		

Pour les informations et les documents qu'ils ont bien voulu me fournir.

UNE COMMANDE SIMPLE POUR LAMPE A DECHARGE HAUTE INTENSITE AU XENON

-George GOH

Applications Manager, ZETEX.

Article traduit pour la Revue 3EI par P. Souillac

Lycée Technique Pierre Mendès France, 88 000 EPINAL

Résumé : La lampe à décharge grande intensité au xénon étant actuellement relativement bien connue quant à ses applications automobiles, son succès et ses avantages par rapport à d'autres types de lampes telles que la quartz halogène commencent à attirer l'attention pour son utilisation dans d'autres domaines. Il est certain que dans le futur, il va être demandé aux concepteurs de systèmes générateurs, de produire des circuits de commande électroniques pour ce type de lampe. Cet article discute des exigences et de techniques efficaces pour la commande.

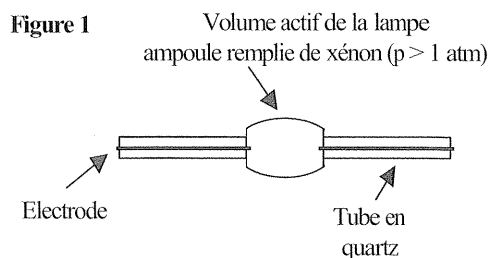
La lampe à décharge grande intensité au xénon (HID : High Intensity Discharge), se veut l'avenir de l'éclairage : elle ne possède pas de filament, et par rapport aux lampes halogènes qui sont universellement utilisées aujourd'hui, son rendement est meilleur et sa température de couleur (4800 K) donne une lumière plus naturelle. Au total, elle est environ trois à quatre fois plus efficace que les lampes halogènes, l'absence de filament implique une grande robustesse ; sa température de couleur naturelle permet de ménager la vue et sa plus grande efficacité en fait un choix pour le futur dans un environnement sensible aux problèmes d'énergie.

Actuellement, les lampes au xénon HID sont bien connues dans le domaine de l'automobile où elles sont principalement utilisées dans les véhicules haut de gamme du fait de leur coût élevé et de la complexité de leur alimentation. En tout cas, leurs applications se développent dans le domaine de l'éclairage architectural et de l'éclairage des devantures de boutiques. On peut prédire que ces deux marchés supplanteront celui de l'automobile.

Les lampes HID au xénon dans le domaine automobile.

Les caractéristiques requises pour l'éclairage automobile en ce qui concerne les lampes au xénon sont uniques. Ceci est principalement dû à la caractéristique inhabituelle de la lampe qui nécessite une dizaine de milliers de volts pour démarrer l'arc. Une fois que la conduction est établie, l'alimentation principale reprend le contrôle et assure le fonctionnement de la lampe. Quand elle est chaude mais non-conductrice la lampe est difficile à réamorcer augmentant la complexité et par conséquent son coût

dans les applications automobiles. La lampe, constituée d'une ampoule sans filament, est remplie d'un mélange de gaz dont le constituant principal est le xénon ; elle est équipée d'électrodes à chaque extrémité. De plus, la surface interne de l'ampoule est recouverte d'un mélange secret de "sels". A la différence des ampoules normales, les gaz de l'ampoule sont maintenus à une pression supérieure à une atmosphère. La figure 1 représente un schéma simplifié d'une lampe xénon HID.

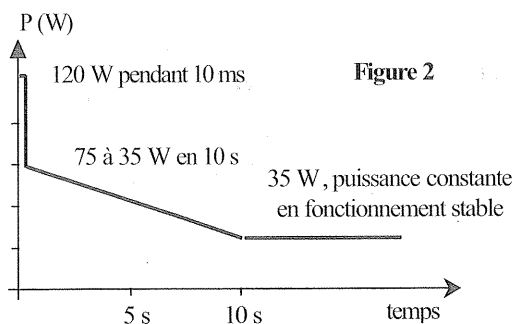


Les caractéristiques électriques des lampes au xénon.

Avant que l'arc ne soit déclenché, les lampes HID se comportent comme un circuit ouvert d'impédance infinie. Immédiatement après l'amorçage et l'établissement de la conduction électrique, on trouve une région d'instabilité qui est visible car la lampe scintille. Cette phase est suivie d'un état de basse impédance quand la lampe fonctionne dans le domaine désiré. Quand l'alimentation de la lampe est supprimée, les sels vaporisés se condensent à l'intérieur de l'ampoule qui retrouve un état de haute impédance rendant difficile son réamorçage. Les lampes HID requièrent une tension très élevée pour démarrer 25 kV ou plus pour déclencher l'arc puis une puissance constante pour maintenir la conduction. Si aucune mesure spéciale n'est prise et si la lampe est alimentée

avec ses caractéristiques nominales, il faut un certain temps (quelques dizaines de secondes) pour obtenir la stabilisation. C'est le temps nécessaire au revêtement de sels pour se vaporiser et s'ioniser à l'intérieur de l'ampoule.

Pour l'utilisation dans les véhicules automobiles, on accélère l'évaporation des sels par un apport supplémentaire de puissance. On peut voir sur la figure 2 un profil typique de la puissance à délivrer au cours du temps pour une lampe à usage automobile de 35 W (OSRAM D2S). Ce surplus de puissance initiale est aussi réutilisé pour le réamorçage à chaud : par exemple, dans l'éventualité où la lampe a été éteinte accidentellement, on doit être capable de rallumer rapidement. La raison de ce problème est que, lorsque l'ampoule est chaude, la lampe se comporte comme un circuit de grande impédance pour l'alimentation, et à moins de trouver un "passage" pour décharger une quantité d'énergie importante, il est impossible de réamorcer la lampe à chaud. Toutefois si trop de puissance est fournie à la lampe, une explosion est probable et il faudra prendre toutes les précautions pour que cela ne se produise pas. *Il est absolument nécessaire de porter des lunettes de sécurité lors de l'expérimentation.*



Utilisation hors du domaine automobile.

Le réamorçage à chaud n'est pas un critère important pour l'éclairage architectural ou pour celui d'un magasin. Dans l'éventualité de l'extinction accidentelle d'une lampe, il suffit d'attendre qu'elle refroidisse avant de tenter de la rallumer. Cette durée peut être de plusieurs minutes, voire plus pour des lampes plus puissantes.

Alimentation en continu.

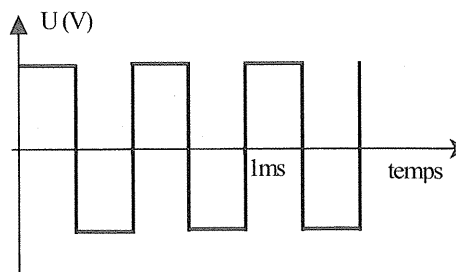
Au début de leur utilisation, les lampes HID étaient alimentées par des sources continues. Cela causait l'érosion d'une des électrodes du fait de l'émission d'électrons, et de ce fait, des difficultés d'amorçage en vieillissant. Pour minimiser cette érosion inacceptable, les premières lampes étaient construites avec des électrodes asymétriques.

Alimentation en alternatif.

Aujourd'hui les lampes HID sont normalement alimentées en alternatif. Un circuit typique fournira pour une lampe de 35 W une tension d'environ 160 V crête à crête avec une fréquence nominale de 500 Hz. Il est courant d'utiliser une configuration en pont complet alimenté à partir d'une source de tension continue. Ceci implique un convertisseur à deux étages et, par conséquent, un prix plus élevé. De plus, comme la lampe doit être alimentée à puissance constante, on encourt des frais supplémentaires dus à la nécessité d'une sorte de circuit de calcul. Un circuit type serait constitué probablement de 5 ou 6 transistors de puissance (Bipolaire ou MOSFET) : un à deux pour l'alimentation continue, 4 pour le pont en H et un microcontrôleur.

La figure 3 montre les formes d'ondes types de commande d'une lampe HID. Que ce soit en alternatif ou en continu, le circuit de commande doit avoir en plus un générateur haute tension de 25 à 30 kV pour l'amorçage de l'arc. Ce peut être une entreprise redoutable que d'utiliser une oscillation forcée dans une configuration en pont, à cause de la compatibilité électromagnétique et du bruit électrique pouvant être à l'origine de la destruction du circuit en cas de sous tension. Un filtrage judicieux et un conditionnement soigné de l'ensemble du montage sont mis en oeuvre pour minimiser ces problèmes. Ceci augmente encore le coût de la réalisation.

Figure 3



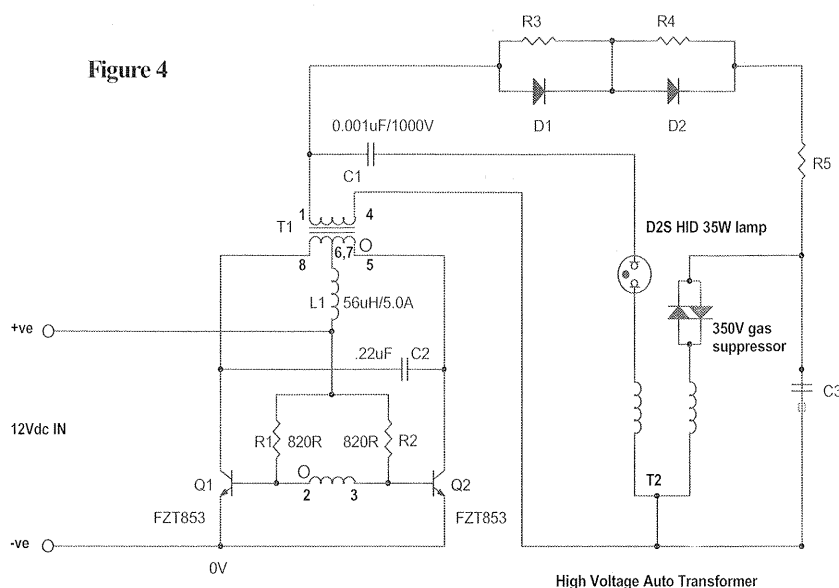
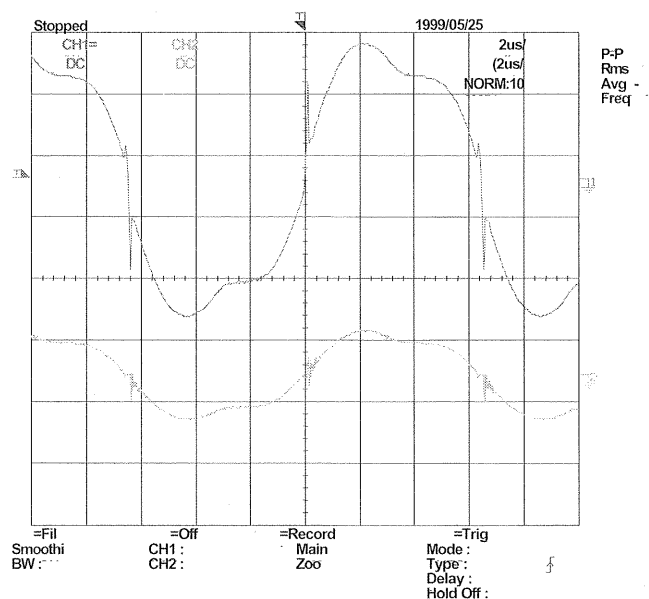


Figure 5



La commande ZETEX pour les applications autres que l'automobile.

La commande ZETEX que l'on va décrire est la simplicité même. C'est une commande à un étage qui alimente aussi le circuit haute tension permettant l'amorçage de la lampe. Elle est représentée figure 4. Deux transistors bipolaires à faible V_{CEsat} , ZTX 851 (Ce composant a été développé par ZETEX pour les ballasts électroniques) sont utilisés dans le commutateur de courant push-pull auto-oscillating. Le transformateur de puissance est conçu avec une inductance suffisante pour imposer un courant constant à travers la lampe, même en cas de variation de la tension d'entrée. Une tension continue alimente

l'enroulement primaire via une inductance qui se comporte comme une source de courant. Une onde sinusoïdale redressée apparaît au collecteur des deux transistors et une onde sinusoïdale à travers l'enroulement primaire avec une amplitude de crête de valeur $\pi \cdot V_e$. Ainsi pour une tension d'entrée de 12 V le transistor ZTX 851, avec 60 V de V_{CE} est un choix idéal. Le circuit ZETEX n'utilise pas de transistor haute tension. Des lampes plus puissantes peuvent être commandées par la même structure avec des transformateurs, des transistors et des inductances de calibres plus élevés.

Cela signifie qu'en alimentant le circuit par une tension constante mais réglable, on alimente la lampe à

puissance constante très simplement en gardant le courant constant dans celle-ci. Le circuit de commande ZETEX est capable de fournir 36 W à la lampe en utilisant 2 transistors en boîtier TO 92 (avec dissipateur). Ce montage a fonctionné plusieurs centaines d'heures sans la moindre défaillance. Ce montage est meilleur marché que la plupart des montages industriels qui emploient une structure en pont complet utilisant des composants en boîtier TO 220. Si on utilise des MOSFET, alors il est très probable qu'ils seront commandés par des transistors bipolaires pour une commutation plus rapide. Pour un pont en H utilisant des MOSFET, cela équivaut à 4 paires de commandes de type push-pull supplémentaires.

Le circuit ZETEX, à la différence du pont complet, génère une onde sinusoïdale et, par conséquent, minimise la signature C.E.M. du système, comparé aux variations rapides de tensions dV/dt des ondes rectangulaires. Aucune tension continue résiduelle ne peut être mesurée aux bornes de la lampe. La figure 5 représente les formes du courant dans la lampe et de la tension à ses bornes. On peut observer sur l'oscillogramme supérieur de cette figure que lorsque la conduction passe du transistor Q_1 au transistor Q_2 l'arc essaie de s'arrêter mais l'inductance du transformateur le maintient et empêche l'extinction. Aucune haute tension n'a besoin d'être "injectée" pour maintenir l'arc une fois la lampe amorcée. La tension mesurée aux bornes de la lampe est de 222 V crête à crête et sa fréquence vaut 77,4 kHz. La valeur de crête du courant est égale à 340 mA. La tension et le courant sont en phase indiquant que la lampe se comporte comme une charge résistive. La puissance moyenne délivrée à la lampe vaut 27 W avec une pointe égale à 38 W. La puissance absorbée par le circuit est égale à 33 W ce qui implique un rendement de 80 %. La plus grande partie de la puissance est dissipée dans le transformateur, dans l'allumeur haute tension ainsi que dans les transistors Q_1 et Q_2 . Nous sommes sûrs qu'il est possible d'améliorer encore l'efficacité du circuit en soignant le bobinage du transformateur. La haute tension pour amorcer la lampe est générée par la même sortie qui alimente la lampe mais elle est redressée et envoyée à un transformateur d'amorçage avec une sortie basse impédance pour la stabilité de l'arc. A condition que la lampe soit froide, l'arc sera initié et se stabilisera dans les 30 secondes sans le moindre apport de puissance additionnelle. Pour l'utilisation en dehors de l'automobile, ce n'est pas un point critique quoiqu'il soit bien de diminuer le temps nécessaire pour atteindre la température de fonctionnement.

Aucun réamorçage à chaud n'est susceptible d'être obtenu à l'heure actuelle, mais une voie nouvelle pour générer un réamorçage à chaud est en développement et fera l'objet d'une publication dans un futur proche. La lampe a été testée en position horizontale ($\pm 10^\circ$) sans le moindre problème de stabilité de l'arc. Elle a aussi été testée en position

verticale et à nouveau l'arc était stable sans la moindre fluctuation. Le circuit présenté fonctionne à 77 kHz ce qui est plus élevé que les valeurs conventionnellement utilisées, mais nous n'avons pas eu de problème en travaillant à cette fréquence élevée et aucune résonance n'a été observée.

La prochaine étape.

Il s'agit maintenant de réduire physiquement le circuit pour qu'il s'adapte à l'arrière de la lampe HID D2S et incorporer un système de réamorçage à chaud pour que ce montage de conception simple puisse être utilisé de façon économique dans l'automobile sous la forme d'un seul bloc.

ZETEX plc a déposé une licence de protection n° 990 7603.6 pour le circuit ci-dessous.

Remerciements

ZETEX plc et les auteurs aimeraient remercier SUMIDA (Japon) qui a travaillé en étroite collaboration avec nos ingénieurs, pour leur patience et pour avoir conçu et fourni plusieurs prototypes compacts de transformateurs d'allumage qui utilisaient les propriétés de leurs fils à section carrée et sans lesquels ce projet aurait pris plus de temps.

Note de P. Souillac (traducteur)

Cet article est paru dans le numéro de septembre 1999 de la revue Power electronics engineering. Depuis, le montage a été amélioré et modifié. Il utilise notamment un transformateur planar dont les enroulements sont intégrés dans le circuit imprimé.

Sur la photographie de la platine d'évaluation (figure 6) on peut aussi remarquer que les transistors sont en boîtier SOT 223 ou DPAK.

L'attention d'éventuels expérimentateurs est une nouvelle fois attirée sur les dangers que peuvent entraîner la manipulation de lampes HID (explosion) et sur la nécessité de protéger ses yeux par le port de lunettes de protection.

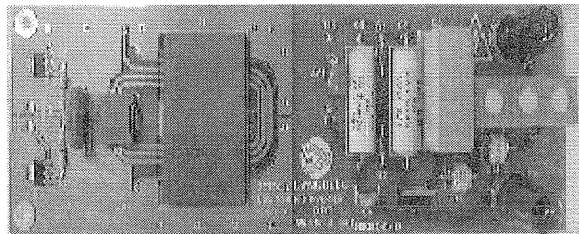


Figure 6 : platine d'évaluation ZETEX

COMMENT MENER UN AVANT-PROJET D'ECLAIRAGE INTERIEUR

Patrick VANDEPLANQUE
IUT de Béthune

Résumé : Après rappel des notions de base sur l'appareillage, on propose une méthodologie des choix successifs menant à un projet d'implantation. Des calculs plus précis, non discutés ici, permettent alors de considérer le confort visuel de l'installation. Un exemple très simple avec solution illustre la méthode proposée.

Connaissances préliminaires

- La lumière est caractérisée :
par sa quantité, c a d son flux exprimé en lumens (lm) p.e une lampe à incandescence de 100 W fournit 1400 lm et un tube fluorescent de 58 W environ 3200 lm
et par sa qualité avec sa température de couleur proximale T°K exprimée en degrés Kelvin (entre 2500 K et 6500 K) et son indice de rendu des couleurs (IRC) généralement entre 50 et 100 selon :
50 < mauvais < 70 < acceptable < 80 < bon < 90 < excellent < 100
- Les lampes sont caractérisées par leur efficacité lumineuse en lm / watt et leur durée de vie. (15 lm/W et 1000 h pour une lampe à incandescence et 90 lm/W et 8000 h pour un tube fluorescent)
Leur qualité de lumière est définie dans les normes européennes – pour les lampes fluorescentes – par un nombre de 3 chiffres : le 1° caractérise l'IRC et les 2 autres la température de couleur :
7.50 signifie un IRC d'au moins 70 (mais < 80) et T°K de 5000 °K
9.37 = IRC d'au moins 90 et T°K = 3700 °K
- Les luminaires sont définis par leur répartition spatiale de lumière, donnée par la courbe photométrique si l'émission est de révolution autour de l'axe optique, et répartis en 10 classes photométriques notées de A à J pour le flux émis vers le bas et de classe T pour le flux supérieur selon la norme UTE (1)
Les pourcentages du flux de lampe émis vers le bas et le haut sont les rendements direct η_d et indirect η_i
L'appareil est alors noté p.e 0,4 D / 0,12 T si 40% du flux de la lampe est émis vers le bas selon la classe D et 12 % vers le haut.
- Le non-éblouissement d'un luminaire à tubes fluorescents est assuré quand sa courbe de luminance, fonction de l'angle de co-latitude γ sous lequel on l'observe, reste à gauche de la courbe frontière définie par Söllner selon le niveau moyen d'éclairage et le type de travail à effectuer noté par une « classe de qualité » notée successivement **A** (travaux très fins : microélectronique, tissage ...) **B** (travaux fins, travail de bureau..) **C** (travail d'atelier, montage de composants..) **D** (travaux ordinaires pour personnes debout et se déplaçant) **E** pour de faibles exigences visuelles, locaux de transit, à occupation non permanente

Avant projet d'éclairage

Dans la mesure où aucune contrainte spécifique n'est imposée au départ, il est conseillé de faire les choix dans l'ordre suivant, chacun d'entre eux restreignant les suivants :

- Fixer le niveau de l'éclairage horizontal moyen à maintenir sur le plan de travail appelé plan utile, situé, sauf indication contraire, à 0,85 m du sol.
Cette valeur dépend du type d'activité et se trouve dans les recommandations éditées par l'AFE . (2)
Travaux de qualité A et industries de couleur : environ 1000 lux Supermarchés (env. 600 lux)
bureaux- salles de classe (env. 350 à 450 lux) restaurants, habitat (env. 150 à 250 lux)
ateliers, garages (200 à 300 lux) hall, entrepôts (env. 80 à 150 lux)

Ces valeurs sont les valeurs minimales en dessous desquelles une opération de maintenance est nécessaire pour relever le niveau.

On doit donc définir un « facteur de maintenance » multiplicateur de ces valeurs qui donnera le niveau de l'éclairage initial E à la mise en service de l'installation.

Ce facteur de maintenance est estimé, en première approximation, à 1,5 (locaux propres)
1,75 (empoussièrément moyen) et même 2 (empoussièrément élevé)

- Choisir le type de lampe, selon l'IRC désiré, l'efficacité lumineuse, la durée de vie et la température de couleur donnée par le diagramme de Kruithof. (voir fig. 1)
Ce diagramme définit une plage de T°K acceptable pour chaque valeur de E .
- Choisir le type de luminaire acceptant une ou plusieurs des lampes précédentes selon le prix, la classe électrique (1 ou 2), l'indice de protection mécanique I.P., la résistance aux chocs, la tenue au feu (M0 à M5) et surtout : La classe photométrique (d'autant plus extensive que les murs sont sombres)
L'absence d'éblouissement, selon les abaques de Söllner
- Définir la hauteur de suspension de l'installation h' entre le plan des foyers lumineux et le plafond en respectant l'architecture de celui-ci.
En appelant h la distance entre le plan des foyers et le plan utile, on définit un rapport de suspension $j = h' / (h + h')$ compris le plus souvent entre 0 et 1/3 (voir fig. 2)
Dans la plupart des cas, on essaie d'avoir h' minimum car :
Les foyers sont plus éloignés du champ de vision horizontal de l'observateur et sont moins éblouissants.
Il en faudra moins pour réaliser l'uniformité d'éclairage sur le plan utile.
Les luminaires devront être équipés de lampes plus puissantes, et donc de meilleure efficacité lumineuse.
- Calculer le nombre minimum d'appareils nécessaires pour assurer l'uniformité d'éclairage, en observant un espacement n de centre à centre d'appareil et en adoptant des distances des appareils les plus proches des murs compris entre $n/2$ et $n/3$.
Les intervalles relatifs n/h sont recommandés par le fabricant en fonction de la classe photométrique et peuvent être différents dans le sens longitudinal et transversal s'il s'agit de luminaires rectangulaires pour tubes fluorescents.
- Calculer l'indice du local, supposé parallélépipède rectangle $K = a.b / h(a + b)$
Si a est la longueur et b la largeur du local, les échanges de lumière directes et réfléchies seront calculés comme se produisant dans un parallélépipède rectangle défini par K .
La majorité des locaux admet un indice variant de 0,6 à 5 et les calculs sont pré-tabulés pour 10 valeurs de K .
- Trouver dans les tables la valeur de l'utilité U exprimée en %. (2 et 3)
L'utilité est le rapport du flux reçu sur le plan utile (soit $E.a.b$) sur le flux sortant des luminaires (soit $\eta_d \Phi_{lampes}$ pour un luminaire direct ou $\eta_i \Phi_{lampes}$ pour un appareil indirect)
L'utilité dépend de K , j , de la classe photométrique A à J ou T et des facteurs de réflexion des parois : plafond (ρ_1), frise (ρ_2) s'il y en a une, murs (ρ_3) et plan utile (ρ_4)
On appelle « groupement de réflexion » les chiffres significatifs de $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ ou ρ_1, ρ_3, ρ_4 ($h'=0$)
Par exemple 753 signifie $\rho_1 = 0,7$ $\rho_3 = 0,5$ $\rho_4 = 0,3$ et $h' = 0$
Quand le luminaire émet vers le bas et vers le haut, on adopte le principe de superposition en le considérant comme la somme d'un appareil direct d'utilité U_{UD} et d'un appareil indirect d'utilité U_i
- Le flux total des lampes est alors $\Phi_{lampes} = E.a.b / (\eta_d U_d + \eta_i U_i)$
en le répartissant dans le nombre minimum d'appareils nécessaires pour l'uniformité, on obtient le flux théorique à installer dans chaque appareil.
Remarque : L'ensemble $\eta_d U_d + \eta_i U_i$ est le facteur d'utilisation noté « u » qui est quelque fois donné directement par le constructeur pour chaque type de luminaire
- On fait choix de la valeur égale ou directement inférieure du flux de ou des lampes réelles à installer dans les luminaires, ce qui peut conduire à en augmenter le nombre, et on définit une nouvelle répartition régulière des foyers, en respectant les conditions d'uniformité et les contraintes architecturales éventuelles du plafond.

Calcul des éclairagements - Vérification du confort

Quand l'installation est complètement définie, il est possible de calculer les niveaux réels d'éclairage moyens initiaux sur toutes les parois délimitant le local : E4 sur le plan utile, E3 sur les murs et E1 au plafond.

On peut utiliser au choix :

la norme UTE C-71-121 où les résultats ont été pré-calculés pour environ 40000 locaux différents
un logiciel de calcul édité par un fabricant d'appareils ou « neutre », sans référence à une marque.

Les conditions de confort visuel à satisfaire sont :

- Une bonne T°K et un bon IRC - pour mémoire car cela a été un critère de choix des lampes
- Pas d'éblouissement d'inconfort créé par les appareils. – également pour mémoire car les courbes de luminance en observation longitudinale et transversale ont été un critère de choix du luminaire.
Il faut cependant en vérifier la validité en cas de changement de puissance des tubes, de leur nombre et du rendement direct du luminaire par rapport aux conditions utilisées dans le catalogue.
- Limiter le rapport r entre la luminance de l'appareil – observé sous une co-latitude moyenne $\gamma = 75^\circ$ - et la luminance du plafond que l'on suppose suivre la loi de Lambert (réflexion diffuse) $L1 = \rho1.E1 / \pi$
Ce rapport dépend de la nature plus ou moins exigeante du travail et va de 20 (classe de qualité A) à 60 (classe de qualité D) avec un pas de 10 en 10.
Ce contraste, insupportable pour un tube fluorescent nu sur un plafond noir, est encore pénible pour ce même tube sur un plafond blanc et devient acceptable quand le tube est monté dans un luminaire à grille paralume ordinaire. Il peut devenir indiscernable si on utilise un appareil dit à « très basse luminance »
- Respecter un rapport E3 / E4 entre l'éclairage des murs et celui sur le plan utile afin que l'œil ne subisse pas de trop forte variation de luminance lorsque le regard passe de la tâche visuelle de luminance L_{tv} liée à E4 à l'observation périphérique des murs de luminance $L3$ liée à E3.
Un rapport $0,5 < E3 / E4 < 0,8$ est en général acceptable pour une tâche visuelle claire (papier blanc)
Si elle est plus sombre, les valeurs de E3 peuvent être réduites d'autant.

Il faut alors éventuellement modifier l'implantation ou le choix des appareils jusqu'à assurer le confort visuel

Exercice d'application : Eclairage d'une librairie

L'éclairage à maintenir dans une librairie est de 450 lux.

Vu le facteur de maintenance, la valeur initiale de l'éclairage doit être de 700 lux.

Afin d'assurer un éclairage diffus et sans ombres, on a choisi un appareil à émission mixte que l'on monte en suspension ($h' = 0,5$ m) et pouvant contenir soit 2 tubes de 1,2m (DP 236) soit 2 tubes de 1,5m (DP 258)

Les documents relatifs à la photométrie de cet appareil (ITT- CLAUDE) sont résumés ci dessous

Les dimensions du local carré sont : longueur a = largeur b = 20 m hauteur du local = 3,85 m
Le groupement de réflexion à considérer est 7553.

L'installation doit convenir aux vendeurs du magasin (classe de qualité B) qui n'ont pas de direction privilégiée d'observation.

Notice photométrique - appareil à écran paralume DP.236 ou DP.258

Flux émis par zone (source de 1000 l)

F'1	F'2	F'3	F'4	F'5
192	101	41	21	381

Classification 0,355 D / 0,381 T

E spacements relatifs pour l'uniformité : en longitudinal $n/h < 1,25$ en transversal $n/h < 1,8$

Les tubes fluorescents sont à choisir dans le tableau ci dessous :

Nuance	T°K	IRC	36W / 1,2m	58W / 1,5m
8.27	2700	85	3300 lm	5200 lm
8.30	3000	85	3300	5200
9.38	3800	95	2300	3700
8.40	4000	85	3300	5200
6.42	4200	60	2850	4750
8.65	6500	85	3200	5000

On utilisera les tables d'utilance en % allégées suivantes :

			CLA	SSE		D				CLA	SSE	T		
		873	871	773	771	753	751	ρ_{1p3p4}	873	871	773	771	753	751
J=0	K=0,6	66	61	65	60	52	49		47	43	40	37	29	28
	1	89	80	87	79	76	71		63	56	53	48	43	40
	1,5	101	89	98	87	88	81		74	65	62	56	54	49
	2	107	93	104	93	95	86		80	70	68	60	60	55
	3	114	98	111	97	104	93		88	75	74	64	68	61
	4	118	101	114	99	109	96		92	78	77	67	72	64
J=1/3	0,6	62	58	61	57	49	48		28	26	24	23	14	13
	1	85	78	83	77	73	69		44	41	38	35	26	24
	1,5	97	87	94	86	85	79		58	52	50	45	37	35
	2	104	92	101	91	92	85		66	59	57	51	45	42
	3	111	97	108	96	101	92		77	67	65	58	55	50
	4	116	100	112	99	106	95		83	71	70	62	62	55

- 1) Donner l'indice du local K, le rapport de suspension j et la ou les nuances de blanc à choisir.
- 2) En ne considérant que la question d'uniformité et en respectant les recommandations du constructeur, donner le nombre minimal d'appareils nécessaires.
- 3) Sachant qu'un appareil DP258 coûte 30% plus cher qu'un DP236, quelle est la meilleure solution? (Nombre et type d'appareils et de tubes). On se basera sur les données du constructeur.
- 4) Définir l'implantation en imposant que les distances des centres des foyers aux murs soient d'au moins 1,4 m.
- 5) Donner les éclairagements sur les parois E1, E3, E4 à la mise en service en utilisant la norme UTE ou un logiciel de calcul.
- 6) L'appareil observé transversalement sous un angle $\gamma = 75^\circ$ a une luminance de 2050 cd / m². Et de 950 cd/m² en longitudinal. Le rapport de luminance lumineaire / plafond est-il acceptable ?
L'éclairage des murs est-il correct si la tâche visuelle moyenne admet 0,7 comme facteur de réflexion ?

Solution

- 1) $h = (3,85 - 0,85 - 0,5) = 2,5 \text{ m}$ donc $K = 4$ et $j = 1/6$
Vu le diagramme de Kruithof, il faut une température de couleur : $3200 \text{ K} < T^\circ < 5400 \text{ K}$
Et comme on peut avoir à observer des dessins ou planches colorés, il faut au moins un bon rendu de couleurs IRC > 80 donc une nuance de blanc 8.38 ou 9.40
- 2) L'uniformité réclame des espacements longitudinaux d'au moins 3,12 m et de 4,5 m en transversal.
Soit $20 / 3,2$ donc au moins 7 appareils en longitudinal
Et $20 / 4,5$ donc 5 appareils en transversal. donc un minimum de 35 appareils

- 3) Le DP 258 (30% plus cher mais 60% de lumière en plus) sera équipé a priori des tubes les plus émissifs soit blanc 8.40 – 5200 lm.
On recherche les utilances directe (pour la classe D) et indirecte (pour la classe T) dans les tables en interpolant entre les valeurs relatives à $j = 0$ et $j = 1/3$ pour $K = 4$ et un groupement de réflexion 753

Classe D	$j = 0$	$U = 109\%$	$j = 1/3$	$U = 106\%$	→	$j = 1/6$	$U_d = 1,075$
Classe T	$j = 0$	$U = 72\%$	$j = 1/3$	$U = 62\%$	→	$j = 1/6$	$U_i = 0,67$

Le facteur d'utilisation $u = \eta_d \cdot U_d + \eta_i \cdot U_i = (0,1075 * 0,355) + (0,67 * 0,381) = 0,637$

$\Phi_{lampes} = ES / u = 700 * 20 * 20 / 0,637 = 439560$ lm et il faut donc 42 appareils à 2 fois 5200 lm
Les conditions d'uniformité seront donc satisfaites.

- 4) On installera 6 rangées espacées de $m = 3,4$ mètres sur le côté b (distance aux murs = 1,5 m) de 7 appareils espacés selon le côté a de $n = 2,8$ m (distance au murs = 1,6 m)

- 5) Pour les éclairements directs, on obtient par la norme UTE

$E_{1,d} = 116$ lux $E_{3,d} = 219$ lux $E_{4,d} = 416$ lux

Pour les éclairements indirects, $E_{1,i} = 479$ lux $E_{3,i} = 189$ lux $E_{4,i} = 281$ lux

D'où à la mise en service $E_1 = 595$ lux $E_3 = 408$ Lux $E_4 = 697$ lux

Le logiciel de calcul ECLINT (4) donnerait :

```

Intervalle longitudinal n=      :      2.8
Intervalle transversal m=     :      3.4
Hauteur Luminaire / plan utile h :      2.5
Hauteur Luminaire / Plafond h'' :      0.5
Espace longitudinal au mur q   :      1.60
Espace transversal au mur p   :      1.50
validez-vous les donnees O/N: o

Indice du local: 4.000
(M)atrice des flux par zone (source 1 Klm) ou (C)lasse directe : c
Quelle est la classe : d
Rendement direct de: 0.355
Le Fu tombant sur le plan utile est: 301.98
Coefficients de reflexion R1,R2,R3,R4
0.7
0.5
0.5
0.3
rendement indirect classe T = 0.381
Les flux reduits sont: f= 1.84 f<= 0.89 fu= 0.75
flux emis par les lampes pour un luminaire: 10400
Les eclairements sont: E1(=E2) = 638.1 LUX
E3 = 425.3 LUX
E4 = 722.8 LUX
changez-vous les reflexions O/N
    
```

- 5) Avec $L1 = \rho l \cdot E1 / \pi = 132$ cd / m², le rapport des luminances luminaire / plafond vaudra 15,5 en observation transversale et 7 en longitudinale.

Ces valeurs, inférieures à 30, sont donc acceptables et excellentes.

Pour $E_4 = 700$ lux, on conseille $350 < E_3 < 560$ lux si la tâche visuelle a un facteur de réflexion de 0,8

Si ce facteur vaut 0,7 ces valeurs doivent être multipliées par 7/8 donc $306 < E_3 < 490$.

La valeur trouvée de 408 lux (ou 425) est acceptable.

Bibliographie

- (1) UTE – Union Technique de l'électricité - Norme simplifiée C-71-121
- (2) AFE – Association Française de l'Éclairage – Recommandations pour l'éclairage intérieur
- (3) L'ECLAIRAGE par P.Vandepanque édit TEC-DOC Lavoisier
- (4) ECLINT : logiciel de calcul d'éclairage intérieur monté et utilisé à l'IUT de Béthune

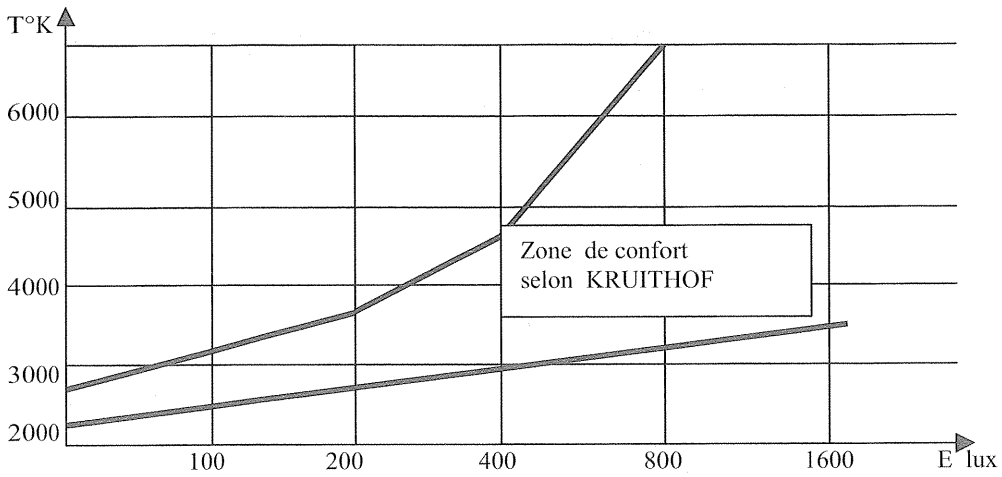


fig - 1 -

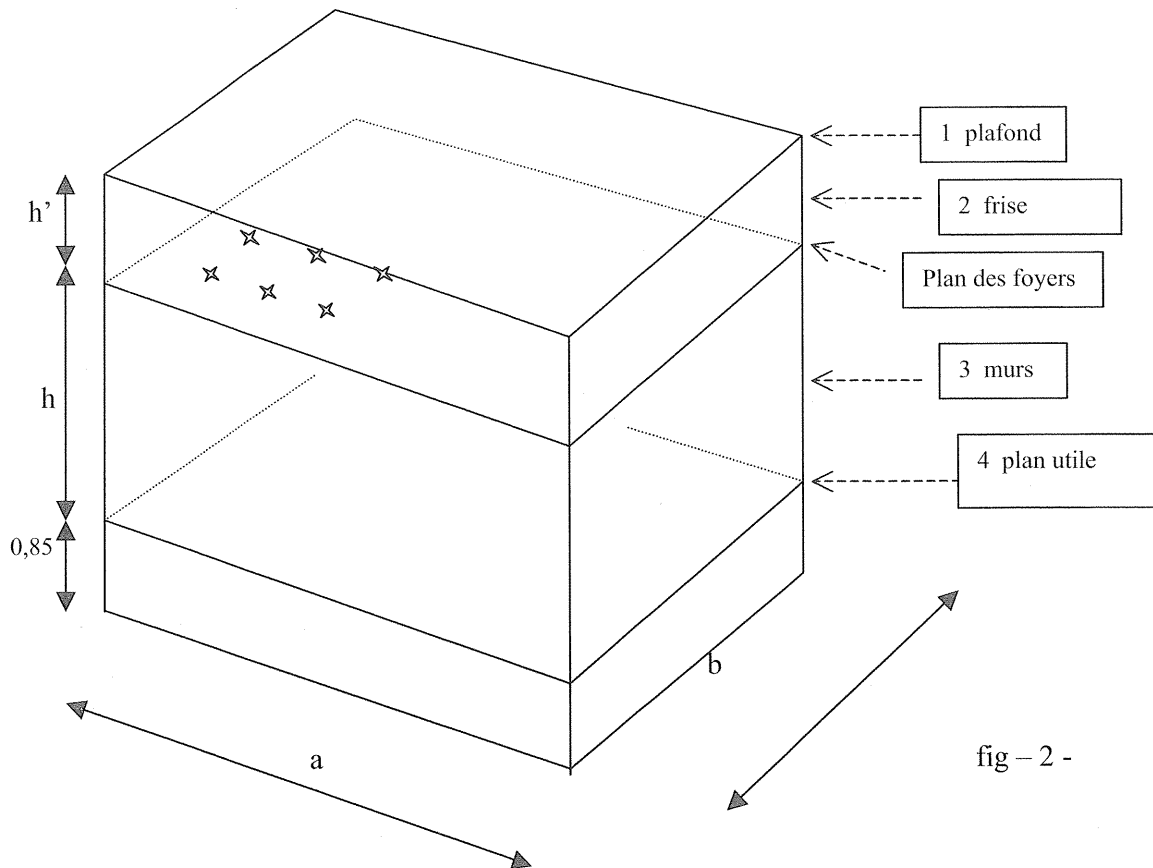


fig - 2 -

MISE EN OEUVRE DE MODULE IGBT SUR LES ONDULEURS AUXILIAIRES DES MOTRICES TGV

Alain JEUNESSE*, Patrick LAUPRETE*, Joël MULLER**

Gérard COQUERY***, Richard LALLEMAND***, Jean-Pierre OUSTEN***

* SNCF, Direction du Matériel et de la Traction, Division Électronique (MTZ), 75012 PARIS

** SNCF, Pôle Maintenance de l'EIMM de Bischheim

*** INRETS, 2 av. du Général Malleret-Joinville 94114 ARCUEIL

Résumé : La SNCF responsable de la maintenance de son matériel roulant ferroviaire, recherche des solutions alternatives innovantes, pérennes, fiables et économiques, pour le traitement de l'obsolescence des composants de puissance. L'étude présentée propose une démarche permettant de conserver la compatibilité entre l'environnement à bord de la motrice TGV et le convertisseur modifié avec une "technologie IGBT". Les travaux ont porté sur un onduleur auxiliaire de 30kVA. Ils ont permis de caractériser les contraintes de mission, de s'adapter à l'interface mécanique existant en respectant les exigences thermiques avec l'objectif d'accroître la fiabilité en service, d'optimiser les caractéristiques de commutation afin de respecter les exigences de CEM.

1- ORIGINE DE L'ETUDE

Dans le cadre de l'amélioration de la fiabilité et la disponibilité opérationnelle des rames TGV, et devant l'obsolescence annoncée des Thyristors GTO¹ de petit calibre (200 à 600A), la SNCF, responsable de la maintenance de ses matériels, recherche des solutions techniques innovantes, pérennes et économiques. Avec le souci d'anticiper cette obsolescence et d'apprendre à mettre en oeuvre des composants de puissance nouveaux, tels que les IGBT², elle a décidé en 1998, de faire l'exercice d'évolution, d'abord sur les onduleurs auxiliaires de 30kVA à MLI³, équipant les motrices du TGV Atlantique (TGVA). Cette étude porte essentiellement sur le traitement de l'obsolescence des Thyristors GTO, et sur l'amélioration de la fiabilité de ces convertisseurs. La population de convertisseurs concernés est de 1080 unités (1050 sont en service sur rame).

Compte tenu de l'évolution permanente de la technologie des composants de puissance [1] et des composants de commande et de contrôle associés, la Direction du Matériel et de la Traction (MT) a également décidé d'étendre cette étude à une démarche prospective sur les modules de puissance fortement intégrés, et sur leur mise en oeuvre. Dans ce cadre, la SNCF a passé un contrat d'étude et de recherche en partenariat avec l'INRETS⁴. Ce dimensionnement des éléments composant le convertisseur intégré. L'étude, comportant trois phases contrat, vise à définir les critères de choix et à préciser, compte tenu des exigences ferroviaires⁵, le dimensionnement des

éléments composant le convertisseur intégré.



Fig. 1 La rame TGVA (photo SNCF CAV)

Les trois phases de l'étude sont les suivantes :

La phase d'apprentissage, où nous chercherons à caractériser les contraintes électriques et thermiques des semi conducteurs, et où nous validerons avec un convertisseur « prototype » la pertinence d'une solution « IGBT ».

La phase opérationnelle qui permettra de lancer l'industrialisation avec la définition du « kit IGBT », la simplification de la cellule de commutation et la définition de l'électronique de commande de grille des IGBT (« driver ») afin de respecter :

- les exigences CEM (non perturbation des équipements voisins) ;
- un verrouillage évitant la commande simultanée de 2 IGBT du même bras ;
- choix d'une structure économique et pérenne de module IGBT.

La phase de recherche permettant de valider de nouvelles technologies :

particulier, l'environnements thermique, électrique, et électromagnétique dans lequel l'équipement doit fonctionner.

¹ Thyristor GTO : thyristor commandé à l'extinction par la gâchette « Gate Turn Off ».

² IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor.

³ Onduleur de tension fonctionnant avec une Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

⁴ Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

⁵ Exigences ferroviaires : ces exigences sont rappelées par les spécifications techniques du matériel roulant ; elles précisent en

- a) Structure onduleur triphasé de puissance fortement intégrée ;
- b) Condensateur de filtrage adapté à cette nouvelle technologie « silicium » ;
- c) Échangeur thermique capable de capter les calories dissipées sous la faible surface de silicium et de les répartir sur une surface d'échange plus importante ;
- d) Électronique de commande de grille (« driver ») également fortement intégrée alimentée par la haute tension (530V dans notre cas) ;
- e) Étude d'une protection rapprochée des interrupteurs de puissance avec information en retour vers la commande actuelle ;
- f) Avec pour objectif un rapport fiabilité/coût supérieur à celui actuel.

2- LA RAME TGVA

La rame TGVA est composée de 2 motrices encadrant un tronçon de 10 remorques. La puissance de traction est fournie par 4 blocs moteurs alimentant chacun 2 moteurs de traction. La puissance motrice installée de 8MW à la jante, permet une vitesse d'exploitation commerciale de 300km/h. Les auxiliaires se classent en deux familles : les équipements nécessaires aux servitudes directement liées au mouvement du train (la traction, le freinage et les fonctions de la cabine de conduite dont les équipements de sécurité) et celles liées au confort des voyageurs et de l'agent de conduite. La puissance installée dédiée aux servitudes traction/freinage/cabine est de l'ordre de 170kW par motrice, celle dédiée au confort des voyageurs est de 330kW. Il faut ajouter à ce bilan, les 300kW installés pour le chauffage de la rame.

2-1 Principe de la distribution de l'énergie pour les auxiliaires[2]

La conception des rames TGV [3] a été conduite avec le souci de veiller à obtenir la plus grande disponibilité des équipements de traction et des auxiliaires, mais aussi avec l'exigence d'une grande fiabilité de ces équipements de façon à réduire les incidents en service et les interventions en maintenance. C'est pourquoi, des redondances ont été aménagées permettant au train de poursuivre sa mission sans aucune gêne pour le voyageur. Il a été fait le choix d'utiliser pour tous les moteurs auxiliaires des moteurs asynchrones, plus robustes que les moteurs à collecteur, ayant des caractéristiques d'alimentation quasi industrielles (380V 50Hz) Ces choix expliquent l'architecture retenue pour la distribution de l'énergie nécessaire aux auxiliaires. L'alimentation est réalisée par deux hacheurs auxiliaires « HAUX » débitant chacun sur une ligne « 500V ». Les convertisseurs (CVS) sont connectés aux lignes 500V par un « OU » à diodes offrant ainsi une parfaite redondance de l'alimentation.

2-2 Auxiliaires de la motrice

Les servitudes de la motrice sont les suivantes :

- Ventilation des blocs moteurs, de leur rhéostat de freinage et des moteurs de traction ;
- Ventilation du bloc auxiliaire
- Circulation de l'huile dans l'ensemble transformateur principal et inductances, ainsi que la ventilation de l'échangeur thermique huile – air de cet ensemble.
- Alimentation du moto compresseur d'air
- Charge de la batterie de chacun des blocs moteurs et la fourniture de l'énergie nécessaire à l'éclairage, aux fanaux, et au fonctionnement de tous les équipements de la cabine et de contrôle commande de la motrice.

A partir du 500V (Fig.4), cinq onduleurs triphasés de 30kVA alimentent l'ensemble des moto ventilateurs, les 2 pompes permettant la circulation de l'huile du transformateur, et le compresseur d'air. Deux chargeurs de batterie de 10kW associés chacun à un bloc moteur assurent l'alimentation en énergie basse tension (72V) de la motrice.

2-3 Auxiliaires du tronçon

Les auxiliaires du tronçon assurent l'alimentation en 220/380V 50Hz de tous les équipements de climatisation des remorques et des cabines de conduite, la ventilation des salles à voyageurs, de la cabine de conduite, des équipements de restauration (froid domestique, fours pour la préparation des plats, etc...). et l'alimentation en 72V basse tension de tous équipements électroniques du tronçon, l'éclairage, les automatismes à relais, etc. Ces auxiliaires se composent de deux onduleurs triphasés de 300kVA et de deux chargeurs de batterie de 30kW. Comme sur les motrices ces convertisseurs sont connectés aux lignes 500V par un OU à diodes.

3- ADAPTATION DU MODULE IGBT À L'ENVIRONNEMENT ONDULEUR [4]

3-1 L'onduleur auxiliaire du TGV A.

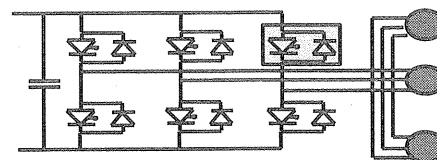


Fig. 2 Schéma de principe de l'onduleur triphasé

La figure ci-dessus montre le schéma de principe de l'onduleur auxiliaire à GTO du TGVA. Ce convertisseur triphasé est essentiellement constitué d'un coffre (630mm, 302mm, 252mm) ventilé, contenant les 6 interrupteurs de puissance (GTO) associés à leur carte électronique de commande de gâchette que l'on appelle également « allumeur », ainsi que les circuits d'aide à la commutation nécessaires aux GTO. Les GTO en technologie « press pack » et

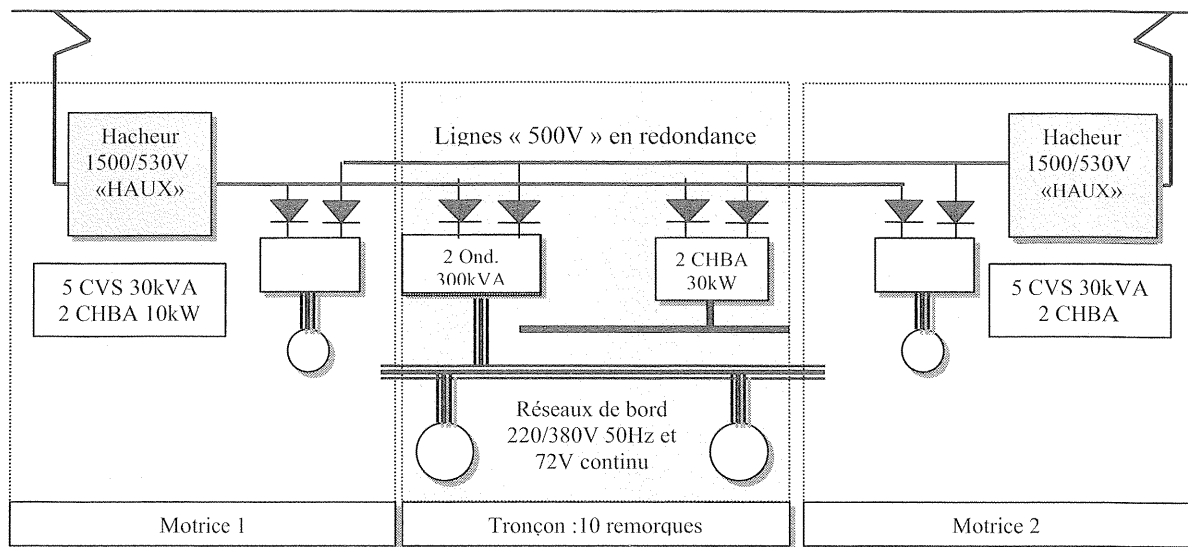


Fig. 3 Schéma de principe de la distribution de l'énergie auxiliaire à bord de la rame TGV Atlantique

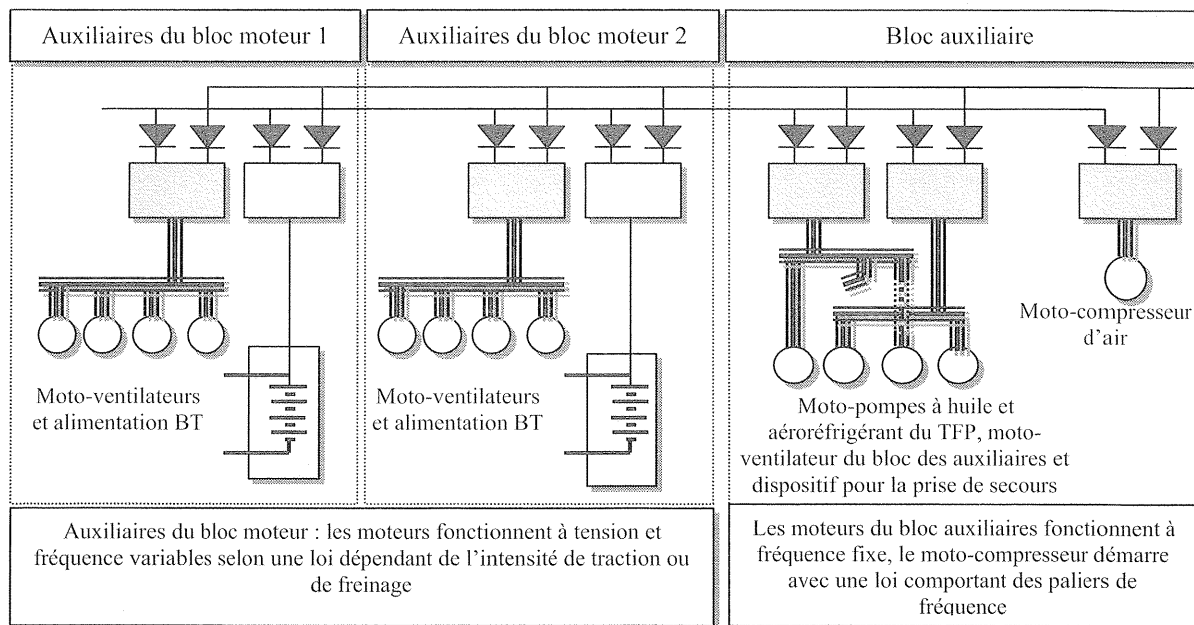


Fig. 4 Schéma de principe de l'alimentation des auxiliaires d'une motrice TGVA

leurs diodes associées sont montés sur des plots isolés de la masse électrique. Les informations utiles au pilotage et à la surveillance de l'onduleur sont élaborées à partir de capteurs d'intensité (TI) et de tension (capteur à effet Hall) situés à l'intérieur du coffre. Cet équipement représente pour la maintenance un ensemble déposable d'une masse de 39,6kg. L'électronique de commande et de contrôle proprement dite de chacun des cinq onduleurs auxiliaires installés sur une motrice, est déportée soit dans chacune des baies bloc moteur, soit dans la baie bloc-Auxiliaire.

3-2 Identification des contraintes.

Les critères de dimensionnement sont liés aux contraintes électriques : courant, tension, fréquence de fonctionnement, à l'encombrement, au choix des composants (modules industriels pérennes), aux aspects thermiques dépendants de la signature électromagnétique acceptable, à la fiabilité, et à la protection intrinsèque de l'onduleur.

Les contraintes électriques d'un convertisseur du bloc Auxiliaire sont illustrées sur la Fig. 5. Dans cet exemple, l'onduleur alimente 3 moteurs de caractéristiques différentes câblés en parallèle. Le courant de démarrage atteint 200A crête, soit une

puissance de 100kVA suivie d'un courant de 80A crête pendant 3s, avant d'atteindre le régime de fonctionnement nominal avec une intensité de l'ordre

de 30Aeff (selon la fonction assurée l'intensité nominale peut atteindre 50Aeff).

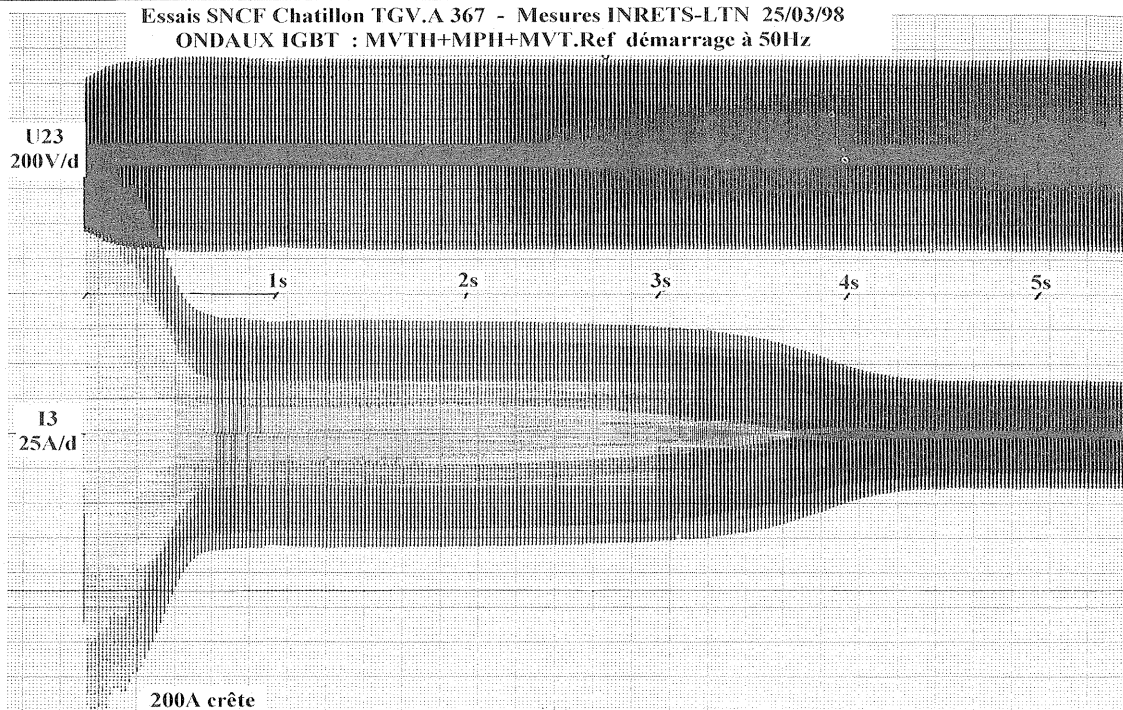


Fig. 5 Courant de démarrage vu par l'onduleur.

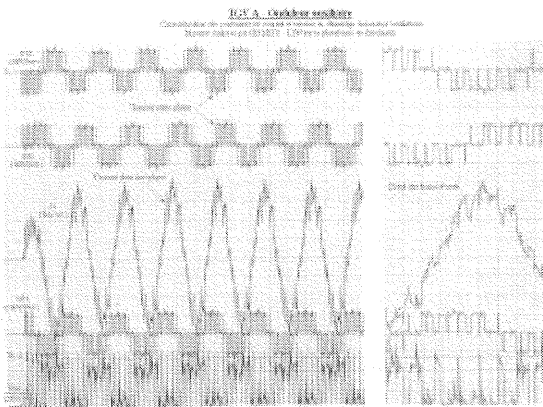


Fig. 6 Allure des courants et tensions au démarrage d'une charge à fréquence fixe 50Hz.

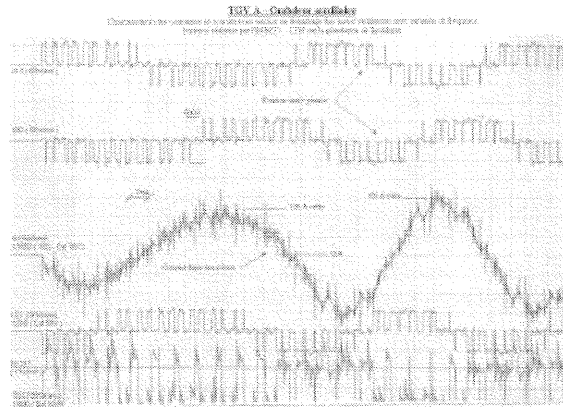


Fig. 7 Allure des courants et tensions au démarrage d'une charge à fréquence variable

Les figures 6 et 7 montrent l'allure détaillée des courants et tensions de moteur travaillant à fréquence fixe (50Hz) (Fig. 6), et d'une autre charge nécessitant un démarrage à fréquence variable (Fig. 7).

Les contraintes d'implantation sont liées à l'existant. Elles sont principalement : la géométrie du coffre onduleur (dimensions, implantations internes), la nature du refroidissement et l'interface vers l'extérieur

(ventilation et pertes de charge, connectique, signaux de commande).

Les paramètres principaux qui interviennent dans le choix du module IGBT sont : la tenue en tension, le courant crête à contrôler, le type de refroidissement, l'existence d'un module standard sur catalogue et sa double source offrant une compatibilité électrique et mécanique. Les tests de sélection du module de

puissance ont porté sur des composants de plusieurs fournisseurs (EUPEC, MITSUBISHI, TOSHIBA et FUJI). Le choix du composant destiné à remplacer le GTO dans les onduleurs auxiliaires du TGVA s'est porté sur un module IGBT 1200V-400A (Fig. 8)

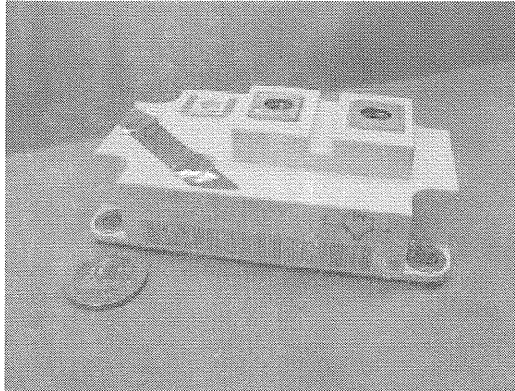


Fig. 8 Module IGBT 1200V 400A (Photo SNCF)

(en remplacement d'un GTO 1200V-300A). Il intègre dans son boîtier non seulement les puces silicium IGBT, mais également les puces de la diode de roue libre associée.

L'IGBT permet de supprimer tous les circuits annexes d'aide à la commutation : condensateurs, inductances, diodes et résistances des snubbers. La phase se réduit à une cellule de commutation composée de 2 modules IGBT associés à un condensateur de filtrage connecté à l'aide d'un circuit non inductif de type "bus bar". Par phase, le nombre de composant du circuit de puissance, avec leurs nombreuses connexions filaires, a été réduit de 27 à 5 (Fig. 9).

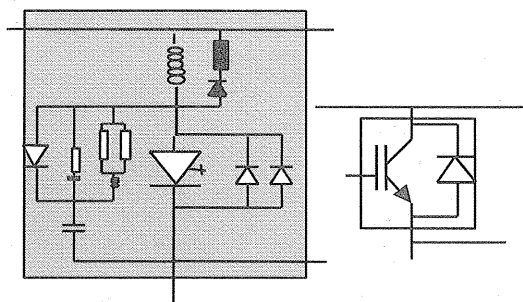


Fig. 9 Schéma électrique d'une cellule de commutation de l'onduleur 30 kVA. Montage à GTO et ses composants associés. Module à IGBT de remplacement.

L'assemblage mécanique par phase est réalisé sur un refroidisseur unique. En effet, le module IGBT réalisant son propre isolement par rapport à la masse, ne nécessite plus de disposer de plots isolés et d'un montage mécanique complexe, comme cela était indispensable avec des technologies classiques « thyristor » ou « thyristor GTO » par exemple. La photographie de la Fig. 10 montre les différences de réalisation, entre une phase d'un onduleur à GTO (à

gauche) et la version modifiée à IGBT (à droite). La photographie Fig.11, montre le «kit» constitué simplement de 2 modules IGBT, de 2 condensateurs, montés sur le refroidisseur et de la liaison électrique « bus bar ».

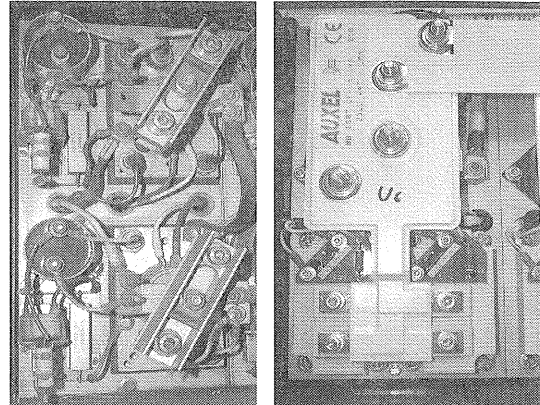


Fig. 10 Comparaison entre les montages à GTO et à IGBT (Photos INRETS SNCF MTZ)

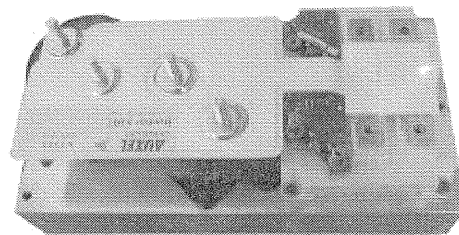


Fig. 11 Le "kit IGBT" (photo SNCF MTZ)

La composition photographique Fig. 12 montre à gauche le coffre onduleur complet à GTO et à droite celui à module IGBT. La mise en oeuvre des modules IGBT permet de réaliser un onduleur dont la masse n'est plus que de 35,5kg, (soit un gain de masse par rapport à l'onduleur à GTO de 4kg).

3-3 Validation expérimentale du dimensionnement thermique

3-3-1 Pertes joules de la cellule de commutation

Le dimensionnement thermique a été conçu de telle sorte à limiter l'excursion des températures de jonction et du boîtier de l'IGBT à une trentaine de degrés afin d'atteindre une durée de vie compatible avec les spécifications de la SNCF.

Après une caractérisation thermique menée sur différents types de refroidisseurs standards, nous avons opté pour un profilé avec une âme de 15mm d'épaisseur usinée en surface pour améliorer le contact thermique entre la semelle de l'IGBT et le

refroidisseur. L'usinage de la surface permet de gagner 20 à 25 % sur la résistance thermique.

La résistance thermique en convection forcée (débit d'air de 2.5m/s) obtenue entre la jonction (silicium) et l'air ambiant est de l'ordre de 0.4°C/W contre 0.7°C/W dans le cas de l'onduleur à GTO. Avec des pertes globales voisines de celles du GTO, l'IGBT est soumis à des températures ou variations de température

sensiblement plus faibles. Ceci contribue évidemment à améliorer la fiabilité de l'appareil.

La solution utilisant un module IGBT dual (intégration de 2 interrupteurs associés à leur diode de décharge, soit une phase complète dans le même boîtier) a été validée du point de vue des contraintes thermiques. Bien que les résultats obtenus montrent des valeurs légèrement supérieures, elle offre cependant un choix alternatif aux services de la maintenance de la SNCF.

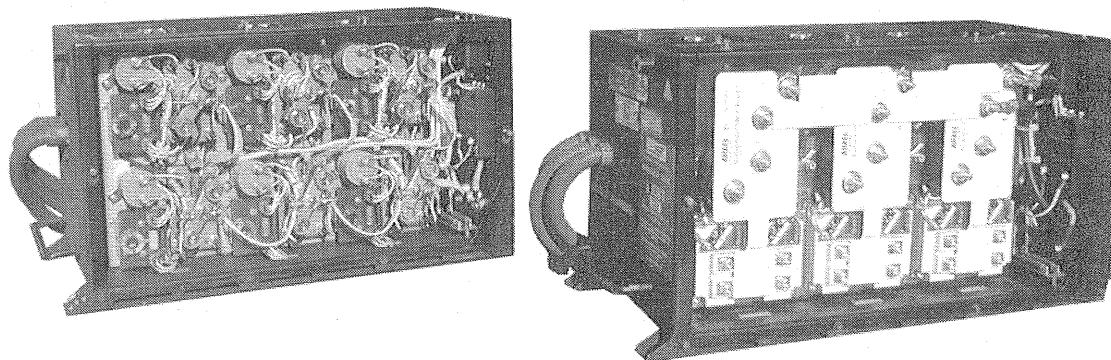


Fig. 12 Onduleurs 30kVA complets en version à GTO à gauche et à IGBT à droite.(Photo SNCF MTZ)

3-3-2 Pertes joules du circuit de commande

Une nouvelle carte allumeur spécifique à l'IGBT a été étudiée. Compte tenu de la commande en tension requise par la structure MOS de l'IGBT, cette carte ne dissipe pratiquement pas d'énergie. Comparativement à une carte allumeur de GTO, la mesure de la température ambiante dans le coffre de l'onduleur a montré une réduction de 30°K. Cette réduction de température dans l'environnement de la carte augmente naturellement la fiabilité de l'ensemble des composants situés dans le coffre, tels les condensateurs, les capteurs, et les autres circuits électroniques.

3-4 Étude expérimentale sur la limitation des dv/dt [5] [6] [7] [8].

L'onduleur auxiliaire à IGBT doit s'intégrer dans l'environnement de la motrice sans générer des émissions électromagnétiques supplémentaires susceptibles de perturber les équipements voisins. La technologie "silicium IGBT" se caractérise par une vitesse de commutation de l'ordre de 10 fois supérieure à celle des thyristors GTO. D'autre part, la technologie d'assemblage "module" augmente la capacité parasite par rapport à la masse au moins d'un ordre de 10 en comparaison à la technologie "press pack". Les distances d'isolement électriques internes au module sont de 0,635mm, dans notre cas, le montage pressé offrait une distance d'isolement de l'ordre du centimètre.

Ainsi, un premier travail consistait à établir les caractéristiques en commutation de l'onduleur à GTO, essentiellement responsables des perturbations conduites et rayonnées. Ces valeurs sont déterminées à la fois par les caractéristiques intrinsèques du GTO et par son circuit d'aide à la commutation. Ce circuit par sa nature limite une partie des émissions en haute fréquence dues à la commutation : les dv/dt limités par les RCD⁶ et les di/dt par les inductances.

Dans le cas du composant IGBT, tous ces éléments d'aide à la commutation peuvent être supprimés. Le seul moyen dont nous disposons, sans l'ajout de composants passifs, est de contrôler le dv/dt en agissant directement sur la commande de grille de l'IGBT afin de rendre le niveau d'émission électromagnétique acceptable par les équipements de la motrice. Rappelons toutefois la nécessité de réduire les inductances de liaison par une connexion de type "bus bar".

L'influence de la résistance de grille (R_{gon}) de l'IGBT à l'allumage de celui-ci, est mis en évidence sur la Fig. 12. Les vitesses de variation de la tension (V_{ce}) et du courant (I_c) de l'IGBT décroissent sensiblement avec la valeur de la résistance de grille : il est donc possible d'ajuster le dv/dt à la valeur souhaitée. Sur cette figure nous avons une variation du dv/dt dans un rapport de 2.5 (de 2300 à 900V/μs). En même temps, le courant

⁶ RCD : réseau d'aide à la commutation constitué par Résistance, Condensateur et Diode

de recouvrement de la diode de roue libre (surcourant observé à l'amorçage) est réduit dans des proportions similaires du fait de la diminution du di/dt.

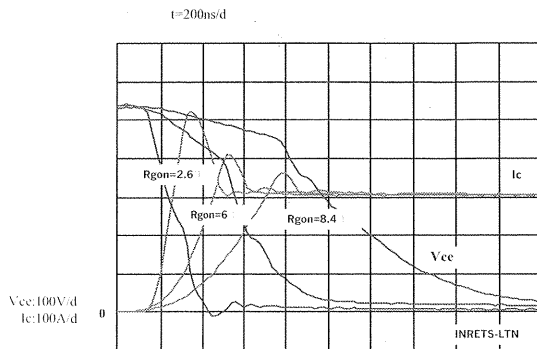


Fig. 12 Influence de R_{gon} (Ω) à l'amorçage de l'IGBT

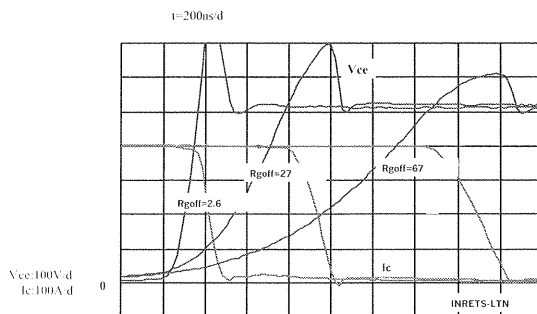


Fig. 14 Influence de R_{goff} (Ω) à l'ouverture de l'IGBT

Nous avons déterminé expérimentalement 3 types de commande, appelées respectivement :

- "Dure" (R_{gon} minimale préconisée par le fabricant)
- "Demi-dure" ou "demi-douce" (le dv/dt étant de l'ordre de $1000V/\mu s$)
- "Douce" (le dv/dt étant de l'ordre de $500V/\mu s$)

Au blocage de l'IGBT, l'influence de la résistance de grille (R_{goff}) est mise en évidence sur la Fig. . De même qu'à l'amorçage, le dv/dt peut être contrôlé au blocage du composant en agissant sur sa résistance de grille. Les dv/dt obtenus vont de 5600 à $700V/\mu s$. La résistance de grille agit également sur le di/dt du courant entraînant une limitation de la surtension.

Les deux graphiques suivants montrent les résultats obtenus lors d'une caractérisation complète des commutations en dv/dt à l'ouverture et à la fermeture en fonction de la commande de grille, du courant commuté I_c et de la température de l'IGBT ($25^\circ C$ et $125^\circ C$) (figure 16 et figure 17).

A l'amorçage (ON), le dv/dt est également constant en fonction du courant sauf pour une commande dure où il est plus élevé à faible courant. Par contre en fonction de la température, contrairement au OFF, les dv/dt augmentent légèrement.

Au blocage (OFF) le dv/dt varie très peu en fonction du courant, sauf quand on applique la commande dure à l'IGBT où il augmente avec le courant I_c . En augmentant la température de l'IGBT, le dv/dt diminue quelque peu.

Ces travaux établissent les relations de l'évolution des dv/dt en fonction de la température du silicium, du courant commuté et du type de commande. On retient que le principe de la commande "demi-douce" ou "douce" permet de maîtriser la valeur du dv/dt et donc le contenu spectral de l'émission électromagnétique conduite.

La Fig.15 illustre les différences entre les commutations des onduleurs à GTO et à IGBT. Les courbes des tensions V_T et V_{ce} présentent des allures voisines. Les courbes de courant I_T et I_c sont par contre très différentes, du fait de l'absence de l'inductance de commutation pour la solution IGBT.

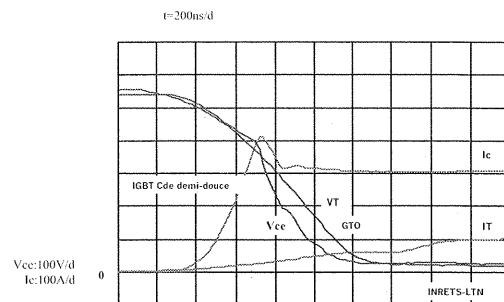


Fig. 15 Commutation à l'amorçage. Différence entre un onduleur à IGBT et à GTO

En conclusion, le choix de la commande de grille (R_{gon} et R_{goff}) s'est fait en fonction d'une part des caractéristiques de commutation de l'onduleur auxiliaire à GTO et d'autre part en fonction des pertes de commutation acceptables compte tenu de l'intégration des modules IGBT. Le compromis accepté s'approche de la commande "demi-douce", il se situe à des dv/dt légèrement supérieurs à ceux générés par l'onduleur à GTO. Bien que l'augmentation des résistances de grille, à l'ouverture et à la fermeture, conduise à un accroissement sensible des pertes de commutation, dans notre application, cet effet n'est pas contraignant car la fréquence maximale de modulation de l'onduleur est de $450Hz$.

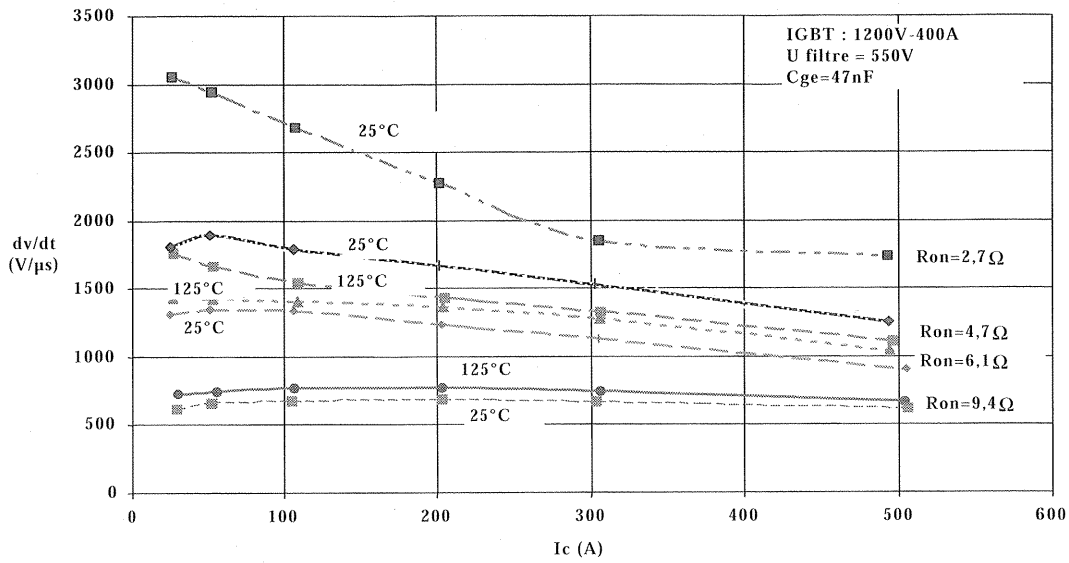


Fig. 16 dv/dt en fonction du courant Ic et de la température à l'allumage ON (INRETS-LTN)

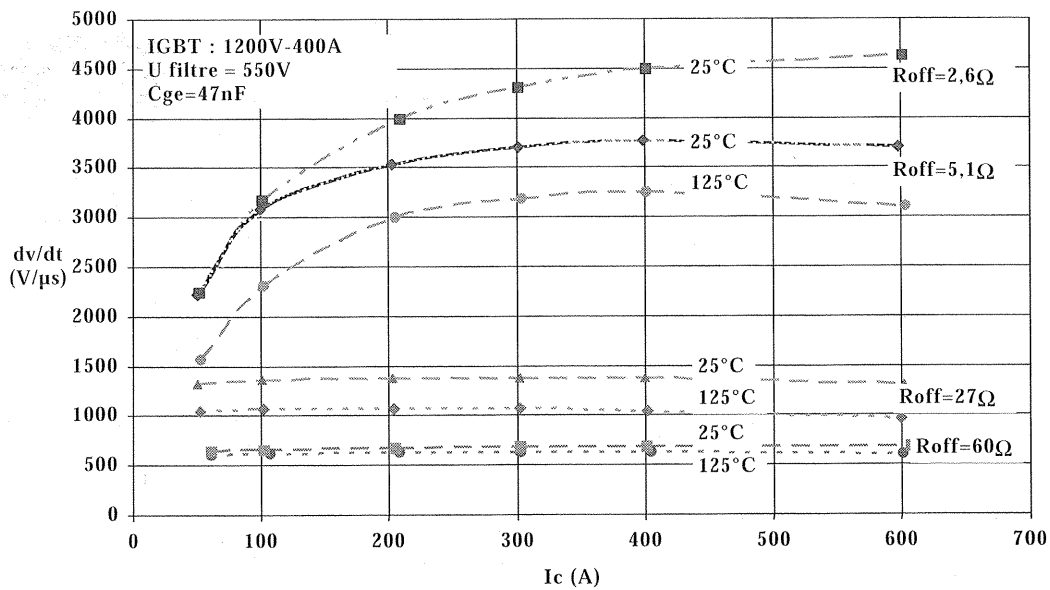


Fig. 17 dv/dt en fonction du courant Ic et de la température au blocage OFF (INRETS-LTN)

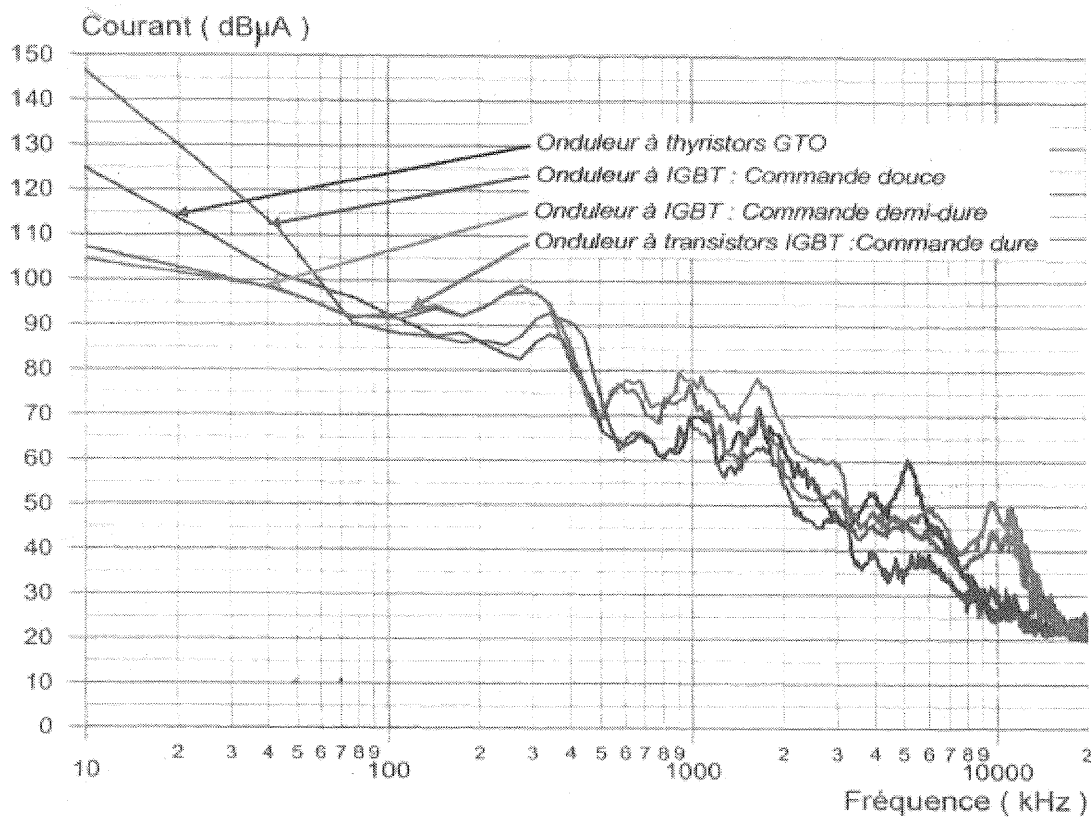


Fig. 18 Courants harmoniques dans le câble d'alimentation +500V (mesures SNCF-IG.LE).

3-5 Mesures CEM sur les onduleurs à GTO et à IGBT.

Les étapes successives de mise en oeuvre de l'onduleur modifié vis à vis des exigences CEM ont été les suivantes :

- Établir pour l'onduleur à GTO, en laboratoire, un référentiel « amplitude fréquence » du bruit émis sur les câbles, côté alimentation (500V) et côté charge (moteur),
- Mesurer dans les mêmes conditions le bruit émis par l'onduleur à IGBT,
- Qualifier l'onduleur à IGBT dans les 5 positions de fonctionnement sur la motrice TGVA.

Les mesures CEM ont été effectuées par le laboratoire de l'Ingénierie de la SNCF (IG.LE) [9].

A titre d'exemple, le graphique Fig 18 donne le contenu spectral des courants harmoniques entre 10kHz et 20MHz générés par les onduleurs à IGBT avec 3 commandes différentes, à comparer au référentiel "GTO". Pour les hautes fréquences, ces courbes confirment les résultats obtenus par les mesures de dv/dt, et montrent un niveau d'émission le plus élevé pour la commande dure. Le niveau

atteint pour la commande douce est comparable à celui du GTO.

Bien que la commande "demi-douce" présente un niveau d'émission sensiblement supérieur à celui du GTO mesuré en laboratoire, la qualification sur la motrice TGVA à l'atelier de Châtillon, et en ligne, a montré la compatibilité entre ses équipements et l'onduleur à IGBT.

4- INDUSTRIALISATION RÉALISÉE PAR LES SERVICES TECHNIQUES DE LA SNCF

L'étude menée par les services techniques de la Direction du Matériel et de la Traction en étroite collaboration avec le pôle maintenance de l'EIMM⁷ de Bischheim, et l'équipe convertisseur des auxiliaires de l'EIM de Châtillon comprend :

- La mise en oeuvre, à partir des travaux réalisés à l'INRETS, des modules IGBT en remplacement des ensembles pressés à GTO sous forme d'un "kit" (Fig 19) ;

⁷ EIMM : Etablissement Industriel de Maintenance du Matériel. L'EIMM de Bischheim, non loin de Strasbourg est responsable de la Maintenance des TGV Sud Est et Atlantique. L'EIM de Châtillon est responsable de la Maintenance 1^{er} niveau des rames TGVA.

- L'étude et la confection des cartes électroniques de commande de grille des IGBT;
- Les modifications du câblage de puissance et du câblage de contrôle commande;
- L'étude mécanique de l'assemblage IGBT - condensateur de filtrage - "bus bar" sur l'échangeur thermique dans le coffre existant ;
- La rédaction des spécifications (essais et contrôle) ;
- Les essais en ligne et la vérification du comportement, puis le suivi du produit avec l'aide de l'équipe CVS auxiliaires de Châtillon.

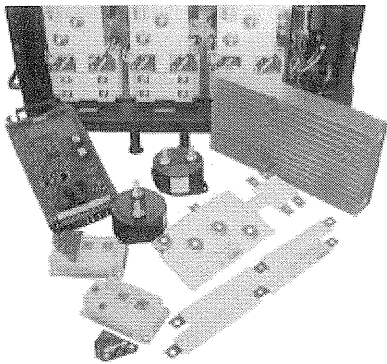


Fig. 19 Industrialisation : Ensemble des pièces composant le "Kit" (photo SNCF MTZ)

Elle se prolonge par une étude d'industrialisation réalisée par l'EIMM de Bischheim. Aujourd'hui 120 coffres onduleurs sont en service et le bilan est particulièrement positif. En effet, le premier coffret modifié a été installé sur rame en octobre 1999, et le temps cumulé de bon fonctionnement pour l'ensemble des 120 convertisseurs est, début mars 2001, de 550 000 heures sans aucune anomalie liée à la mise en oeuvre des « kits IGBT ». La collaboration étroite entre la Direction des Achats à Lyon et les services techniques a permis également d'atteindre un bilan économique très intéressant par rapport à une évolution technique conservant la structure actuelle à GTO. Le gain est de l'ordre de 4000F par convertisseur. Il a donc été décidé de poursuivre l'action d'assainissement du parc en constituant l'approvisionnement pour 300 autres coffres onduleurs supplémentaires. Les premiers équipements ont été mis en service sur rame début février 2001.

Les innovations essentielles réalisées au cours de ces travaux par rapport à la technologie « thyristor GTO » sont les suivantes :

- Simplification et amélioration des performances de l'échangeur thermique offrant une moindre pollution des ailettes et supprimant ainsi leurs nettoyages réguliers ;
- Commande de grille de l'IGBT peu énergétique offrant un gain en température au voisinage de l'électronique de 30°K (c'est un atout évident en fiabilité), réduisant du même coup la charge des alimentations électroniques ;
- Verrouillage des commandes de grille pour éviter la conduction simultanée de 2 IGBT d'un même bras permettant de « vivre » dans une ambiance électromagnétique très sévère ;
- Adaptation de la commande de grille pour satisfaire en émission aux exigences CEM : commande appelée "demi douce" ;
- simplification du montage des composants de puissance offrant une plus grande accessibilité aux composants sensibles et une simplicité de l'industrialisation ;
- Suppression des composants de puissance d'aide à la commutation (un autre atout vers la fiabilité) ;
- Utilisation d'un "bus bar" offrant d'une part : une simplicité mécanique de câblage du circuit de puissance, et d'autre part une liaison peu inductive.

Il faut également remarquer la qualité de réalisation du « kit » par les services de production de l'EIMM de Bischheim, qui se concrétise par la fiabilité et le comportement exemplaire en service de ces onduleurs qui ne fait apparaître aucun défaut de jeunesse...

5- CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats de l'étude proposée par la SNCF ont permis de montrer la pertinence de la mise en oeuvre des modules IGBT pour le remplacement des GTO de petits calibres. Les travaux de recherche en laboratoire à l'INRETS ont mis en évidence les critères qui permettent de maîtriser le comportement de l'IGBT en commutation pour satisfaire aux exigences imposées par les interfaces fonctionnelles, mécaniques, thermiques et CEM lors du traitement de l'obsolescence des GTO.

Après la réalisation d'un prototype d'onduleur auxiliaire à module IGBT, puis ses essais de validation en ligne sur la motrice TGVA sans incidents, la SNCF a transformé progressivement 120 de ses onduleurs à GTO. Cette démarche montre également tout l'intérêt d'un partenariat visant au transfert de connaissance entre un laboratoire de recherche appliquée et des services techniques chargés de la maintenance ferroviaire.

Cette industrialisation réussie met les services techniques de la SNCF en position de réagir de manière efficace à toute annonce d'obsolescence de GTO de petit calibre.

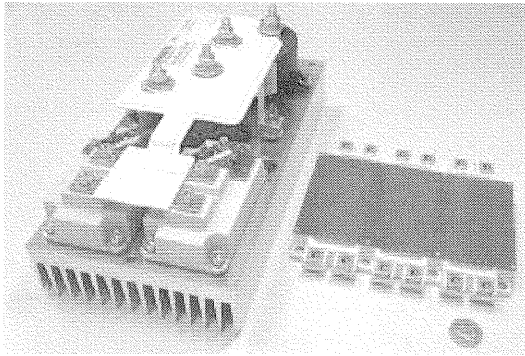


Fig. 20 Illustration d'un onduleur triphasé intégré (Econopack+ EUPEC) en comparaison avec le "Kit IGBT" ne réalisant qu'une phase onduleur (Photo SNCF MTZ)

Dans un proche avenir, l'innovation technologique vers une intégration complète des onduleurs triphasés de puissance devrait conduire à des solutions répondant à la problématique fonctionnelle du traitement de l'obsolescence des GTO. La photographie Fig.20 évoque déjà l'avancée technologique réalisée pendant ces deux dernières années : à gauche le « kit IGBT » constituant simplement une phase onduleur, à droite l'onduleur triphasé complet, non encore commercialisé, ayant quasiment les mêmes performances électriques que l'onduleur modernisé, sur lequel nous avons monté une ébauche de l'électronique de commande rapprochée qui sera probablement réalisée en technologie CMS⁸

REFERENCES

- [1] G.COQUERY : les modules IGBT de forte puissance. Leur essor dans les applications de traction ferroviaire. Revue de l'Électricité et de l'Électronique N°9 Octobre 1998.
- [2] J.P. DEMOY : Record mondial de vitesse sur rail. Revue Chemin de Fer n°405. 1990/6
- [3] F. LACÔTE : Les trains à grande vitesse. Revue Générale des Chemins de Fer n°10. octobre 1991
- [4] R. LALLEMAND, G. COQUERY, P.LAUPRETE, A.JEUNESSE, J.MULLER : Application des modules IGBT au traitement d'obsolescence des GTO dans les Onduleurs Auxiliaires du TGVA. Amélioration de la fiabilité. EPF, Lille. 2000
- [5] P.A.COGNON : Reducing IGBT turn OFF transients by use soft turn off gate drive. Power Conversion. May 1998.
- [6] N.IDIR, J.J. FRANCHAUD, R. BAUSIERE, A.BRIFFAUT : Dispositif de contrôle des gradients de courant ou de tension pendant la commutation des transistors de puissance à grille isolée. EPF, Belfort,1998
- [7] C.GERSTER, P.HOFER : Gate-controlled dv/dt and di/dt limitation in high power IGBT converters. EPE Journal, vol. 5. January 1996
- [8] S.GEDIGA, R.MARQUARDT, R.SOMMER : High power IGBT converters with new gate drive and protection circuit. EPE, Sevilla. 1995
- [9] F.VIENNOT, P.CABARROQUE : Onduleur auxiliaire TGV à IGBT. Courants générés sur la source et la charge. Procès Verbal d'Essai n°7109. 17/04/ 2000.

⁸ CMS : composants montés en surface.

Alimentation d'une Machine Asynchrone par un Onduleur de Tension à Commande M.L.I. Naturelle et Suboptimale

T. REKIOUA , D. REKIOUA

Laboratoire LMC

BP 464, Béjaïa-liberté

06000 BEJAIA – ALGERIE

E-mail: dja_rekioua@yahoo.fr

Tel : (213) 34-214333/35 Fax : (213) 34-214332

B. LAPORTE

INPL, ENSEM

Laboratoire GREEN

54 500 – Vandoeuvre les Nancy- FRANCE

E-mail : bernard.laporte@inpl-ensem.fr

Tel : 03-83595681 Fax: 03 –83 595653

Résumé :

Dans cet article, nous proposons l'étude théorique par simulation numérique et la réalisation pratique de deux stratégies de commande de modulation de largeur d'impulsion (naturelle et suboptimale) dans le cas d'un onduleur de tension alimentant un moteur asynchrone triphasé. La méthode de simulation numérique utilisée est basée sur la détection du changement de modèle du convertisseur statique alimentant la machine. La modélisation de la machine est faite dans le repère de Park lié au champ tournant statorique. Les résultats obtenus par simulation numérique sont comparés aux résultats expérimentaux.

Mots-clefs :

Moteur asynchrone, modulation de largeur d'impulsions (M.L.I.), M.L.I naturelle, M.L.I suboptimale, onduleur de tension.

1.Introduction :

Les progrès technologiques récents dans les domaines des semi-conducteurs et de la micro-électronique ont ouvert un large domaine d'application aux techniques de modulation de largeur d'impulsions dans le contrôle de la tension de sortie des convertisseurs statiques [1], [2], [3]. L'emploi de cette technique est intéressant dans le cas d'onduleurs triphasés associés à des machines à courants alternatifs, rendant possible le contrôle en amplitude et en fréquence des composantes fondamentales des tensions de sortie de l'onduleur de tension, ce qui permet d'augmenter leurs performances dynamiques. L'utilisation des méthodes de commande M.L.I. permet l'élimination des harmoniques de courant indésirables pour le fonctionnement des machines, à savoir réduction de l'amplitude des ondulations du couple électromagnétique et augmentation du rendement [4].

Dans cet article, nous présenterons l'étude par simulation numérique et expérimentale de deux stratégies de commande par modulation de largeur d'impulsions (M.L.I naturelle et M.L.I suboptimale) dans le cas d'un onduleur de tension alimentant un moteur asynchrone triphasé. La méthode de simulation numérique utilisée est basée sur la détection du changement de modèle de l'ensemble machine - convertisseur et la décomposition du système global en blocs distincts [5]. La modélisation de la machine est faite dans le repère (d,q) de Park lié au champ tournant statorique. La génération des signaux de commande est présentée dans les deux cas. Les résultats de simulation numérique sont comparés aux résultats expérimentaux.

2. Description du système:

Le système global est représenté sur la figure 1, il est composé d'une machine asynchrone triphasée dont les paramètres sont donnés en annexe A. Cette machine est alimentée par un onduleur de tension à transistors IGBT. La commande de l'onduleur est faite par deux types stratégies de M.L.I (naturelle ou suboptimale).

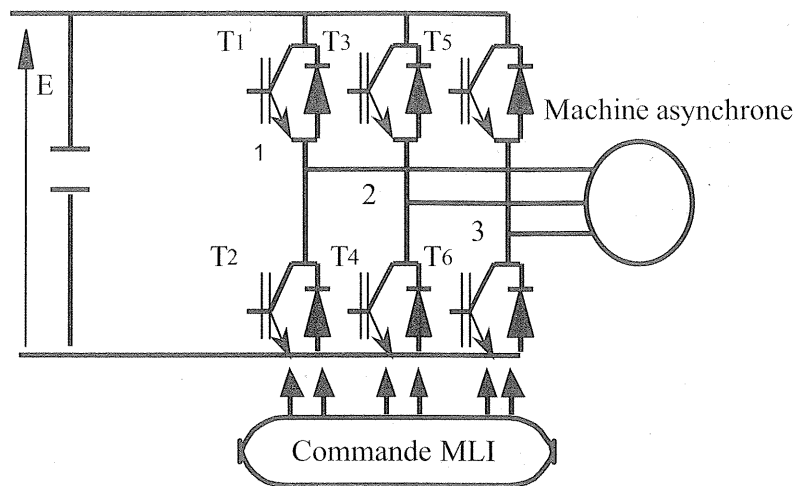


Figure 1. Schéma descriptif du système

3. Modélisation du système:

La modélisation du système est basée sur le concept de la décomposition en blocs du système global, ce qui permet donc le développement d'une bibliothèque de modules de sous-programmes [5]. Ces modules peuvent être réutilisés dans d'autres programmes. Dans notre cas, on distingue les modules suivants :

- bloc source
- bloc onduleur
- bloc machine asynchrone
- bloc commande M.L.I.

3.1 Bloc Source :

($V_s = E$) est supposée constante.

3.2 Bloc Onduleur :

L'onduleur est modélisé par une matrice de connexion dont les éléments sont des variables booléennes. Pour cela on définit l'interrupteur équivalent T_{ei} , constitué par un transistor et une diode en antiparallèle. On peut exprimer son état logique de la manière suivante:

$$T_{ei} = T_i + D_i \tag{1}$$

Avec : $T_i = 1$ si le transistor T_i est passant, sinon $T_i = 0$
 $D_i = 1$ si la diode D_i est passante, sinon $D_i = 0$ ($i=1, \dots, 6$)

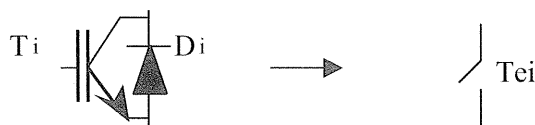


Figure 2. Schéma d'un interrupteur équivalent

La variable logique T_{ei} est validée suivant les signaux de la commande M.L.I. Connaissant l'état de chaque interrupteur, on peut définir la matrice de connexion de l'onduleur de la façon suivante:

$$[S] = \begin{bmatrix} T_{e1} & T_{e2} \\ T_{e3} & T_{e4} \\ T_{e5} & T_{e6} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Les tensions imposées dans chaque bras de l'onduleur sont calculées par:

$$\begin{bmatrix} V_{im1} \\ V_{im2} \\ V_{im3} \end{bmatrix} = [S] \cdot [E, 0] \tag{3}$$

Dans le cas d'un système équilibré à neutre isolé, on obtient les tensions simples imposées aux phases du moteur par la relation suivante:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{im1} \\ V_{im2} \\ V_{im3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.3 Bloc Machine:

3.3.1 hypothèses :

Pour établir les équations électriques de la machine, nous considérons les hypothèses suivantes [8] et [9] :

- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé.
- On néglige les pertes ferromagnétiques.
- On suppose que les résistances sont constantes (indépendantes de la température et de la fréquence).
- On néglige l'effet des encoches.
- On suppose une distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.

3.3.2 Equations électriques [8] :

Pour simplifier la résolution numérique des équations électriques de la machine asynchrone dans le repère de phase (a, b, c), on introduit la transformation de Park normalisée P(θ_s) qui rapporte les équations à un repère (d, q) fixe par rapport au stator (figure 3).

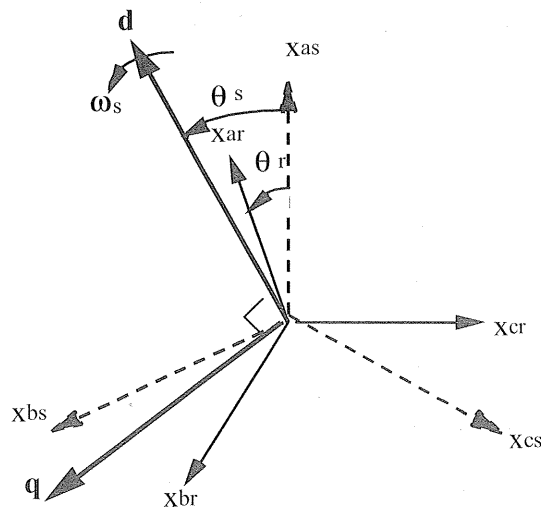


Figure 3. Définition des différents angles dans le repère (d, q) par rapport au stator

Les grandeurs courant, tension et flux dans le repère de phase (a, b, c) du stator sont ramenés au repère (d,q) par la transformation suivante :

$$X_{dq} = P(\theta_s) \cdot X_{abc} \quad (5)$$

X peut être le vecteur colonne représentatif des tensions, courants ou flux avec :

$$P(\theta_s) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_s) & \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Les équations de la machine dans le plan (d, q) lié au champ tournant statorique s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix}$$

avec : (7)

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{sl} \\ \omega_{sl} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \\ \varphi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \end{cases} \quad (8)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (9)$$

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad (10)$$

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \quad (11)$$

où :

L_s : inductance cyclique du stator

L_r : inductance cyclique du rotor

M : inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor

ω_s : vitesse angulaire électrique du repère (d,q) dans le référentiel statorique

ω_r : vitesse angulaire électrique du rotor dans le référentiel statorique

ω_{sl} : vitesse angulaire électrique du rotor dans le référentiel rotorique

Le couple électromagnétique est donné par :

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [\varphi_{ds} \cdot i_{qs} - \varphi_{qs} \cdot i_{ds}] \quad (12)$$

p est le nombre de paires de pôles.

3.3.3 Equation mécanique :

L'équation mécanique de la machine s'écrit d'une manière générale sous la forme suivante :

$$T_e = T_l + J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} + f \cdot \Omega_r \quad (13)$$

avec:

T_l : couple résistant

J : moment d'inertie de la partie tournante

f : coefficient de frottement visqueux

Ω_r est la vitesse mécanique de rotation du rotor

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{p} \quad (14)$$

Pour une machine asynchrone triphasée alimentée en tension, les tensions statoriques (V_{ds} , V_{qs}), le couple de charge constant T_l et la vitesse du champ tournant (ω_s) sont considérés comme variables d'entrée. Les variables de sortie sont les courants (i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr}) et ω_r .

3.4. Bloc Commande:

3.4.1 M. L. I. naturelle :

Les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur sont déterminés par l'intersection du signal de la tension de référence appelée modulatrice avec un signal triangulaire de haute fréquence appelé porteuse (figure 4.). Pour caractériser la commande, on définit deux paramètres :

- l'indice de modulation m , égal au rapport f' / f des fréquences de la porteuse et de la référence.
- le coefficient de réglage en tension r , égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation.

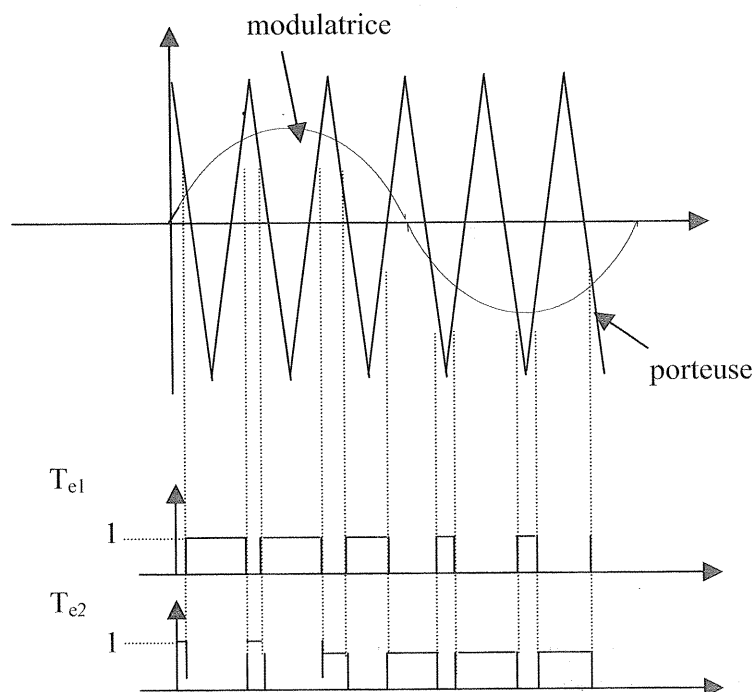


Figure 4. Principe de la M.L.I naturelle.

Dans le cas de la M.L.I triphasée, la porteuse est commune pour les trois phases et la modulatrice est propre à chaque phase et les tensions de référence sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} V_1 = V_{ref} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \\ V_2 = V_{ref} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_3 = V_{ref} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (15)$$

où :

T : représente la période des références sinusoïdales

V_{ref} : amplitude des références sinusoïdales

3.4.2. Principe de la M.L.I suboptimale:

Afin de réduire le taux de distorsion d'harmoniques du courant de sortie de l'onduleur et d'augmenter le rendement de l'onduleur, on injecte aux références triphasées des harmoniques de rang 3 et d'amplitudes égale à $V_{ref} / 6$ et elles sont données par les expressions suivantes [6], [8] :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 = V_{\text{ref}} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{V_{\text{ref}}}{6} \sin\left[3\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\right] \\ V_2 = V_{\text{ref}} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{V_{\text{ref}}}{6} \sin\left[3\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \\ V_3 = V_{\text{ref}} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{V_{\text{ref}}}{6} \sin\left[3\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \end{array} \right. \quad (16)$$

4. Réalisation pratique de la commande:

4.1. Génération des signaux de commande:

La génération des trois références triphasées équilibrées est assurée par une mémoire morte EPROM dans laquelle nous avons stocké les trois références triphasées comme indiqué sur le Tableau 1 .

Adresses	Valeur stockée
0	V ₁
1	V ₂
2	V ₃
3	V ₁
...	...
...	...
...	...
N-4	V ₃
N-3	V ₁
N-2	V ₂
N-1	V ₃

Tableau 1. Stockage des références triphasées

Ces données seront converties en grandeurs analogiques à l'aide de convertisseurs numériques - analogiques (CNA) à 8 bits. Le schéma de principe est représenté sur la figure 5. La période des tensions de référence triphasées est donnée par :

$$T = 2.N.T_s \quad (17)$$

où :

T_s est la période d'horloge du compteur, elle représente la vitesse de lecture des données numériques stockées dans l'EPROM

N : est le nombre de cases mémoires occupées par les trois références triphasées.

La génération de la porteuse est obtenue à partir de compteurs - décompteurs (figure 6).

La période de la porteuse est donnée par :

$$T' = 2.N'T_p \quad (18)$$

où :

T_p est la période d'horloge du compteur - décompteur.

N' est le nombre de points de la demi période de la porteuse.

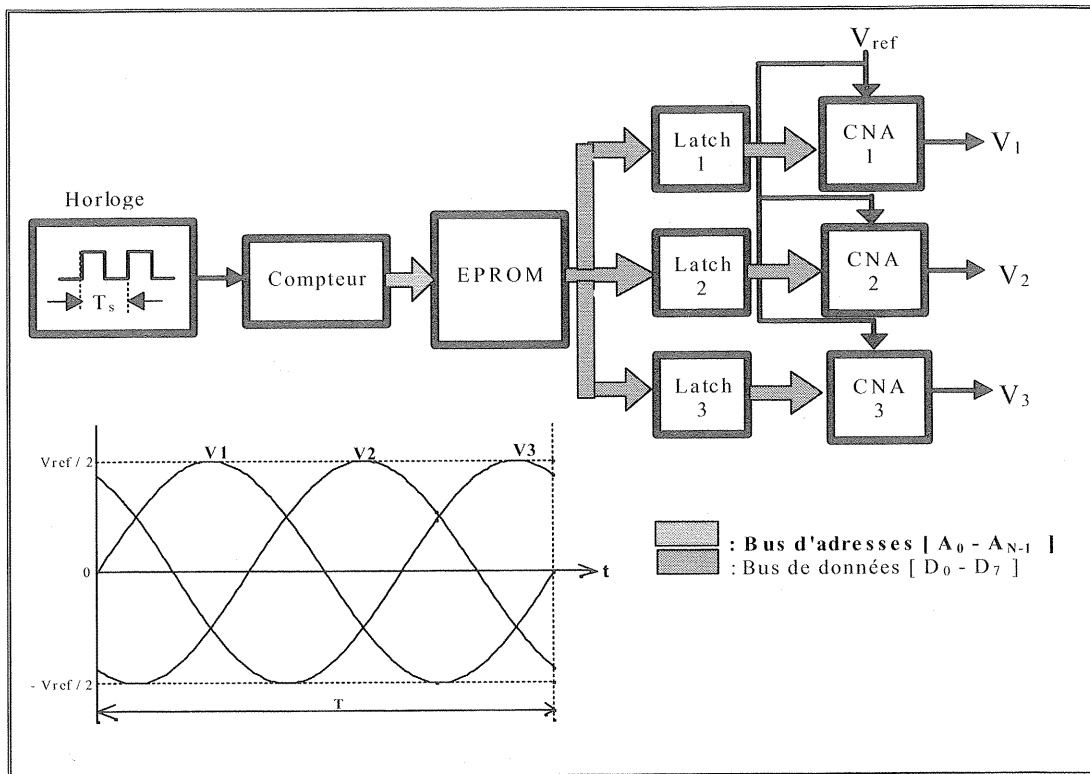


Figure 5. Schéma de principe de la génération de la référence triphasée

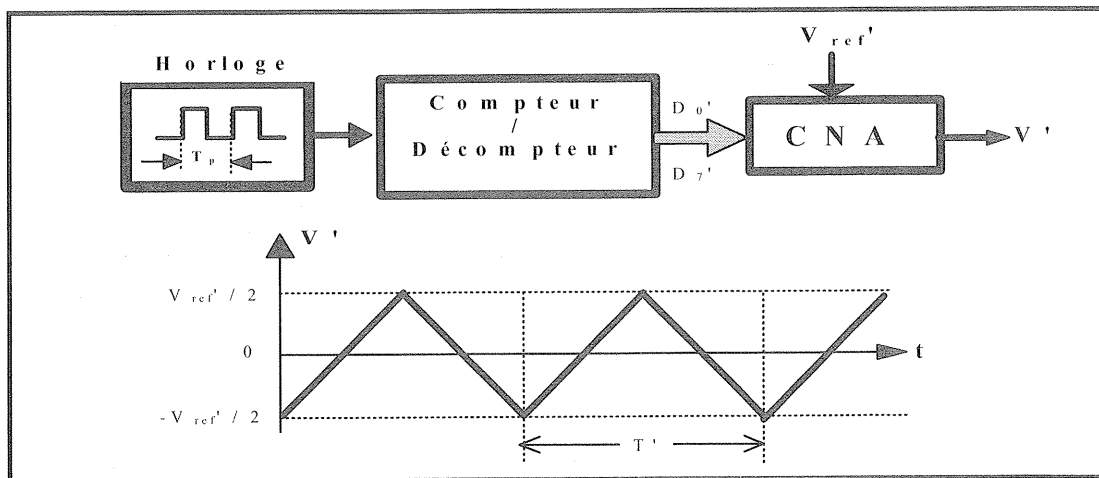


Figure 6. Schéma de principe de la génération de la porteuse

4.2. Protection des transistors de puissance:

Les signaux de commande des interrupteurs T_{e1} et T_{e2} d'un même bras de l'onduleur étant parfaitement complémentaires, il est nécessaire d'introduire un temps mort au moment de leurs transitions. Pendant ce temps mort, aucun des deux interrupteurs d'un même bras n'est commandé, assurant ainsi une commutation sûre, sans risque de court-circuit de la source d'alimentation de l'onduleur [7].

5. Simulation numérique:

Nous avons utilisé une méthode de simulation basée sur [5] :

- l'adaptation du pas de calcul aux événements conduisant aux changements des différents modèles.
- la décomposition du système global en blocs distincts.
- la résolution des équations différentielles par l'algorithme de Runge Kutta d'ordre 4.

6. Résultats de simulation numérique et expérimentaux:

Nous avons étudié deux types de stratégies de M.L.I (naturelle et suboptimale) à une machine asynchrone (annexe A) alimentée par un onduleur de tension. On s'est intéressé au régime permanent afin d'étudier la forme du courant et son analyse spectrale pour différents indices de modulation ($m=9$ et $m=15$). La figure 7. représente les résultats de simulation (les tensions de référence et de la porteuse, le courant de ligne qui circule dans la machine, et l'analyse spectrale de ce courant) dans le cas de la M.L.I naturelle, à une fréquence de 37 Hz. Pour la même fréquence et mêmes indices de modulation, les courbes dans le cas de la M.L.I suboptimale sont représentées sur la figure 8.

La figure 9 et la figure 10. (les tensions de référence et de la porteuse, le signal de commande, le courant de ligne qui circule dans la machine, et l'analyse spectrale de ce courant) représentent respectivement les résultats expérimentaux, obtenus dans le cas de la M.L.I naturelle et suboptimale, pour la même fréquence et les mêmes indices de modulation. Nous remarquons que l'allure du courant circulant dans la machine tend vers une sinusoïde, avec l'augmentation de l'indice de modulation m , ce qui est montré par l'analyse spectrale de celui-ci. En plus la commande suboptimale réduit sensiblement les harmoniques du courant de sortie de l'onduleur et augmente le rendement de l'onduleur.

7. Conclusion:

Dans cet article, nous avons présenté la réalisation modulaire d'un onduleur de tension commandé par deux stratégies de commande MLI (naturelle et suboptimale) en vue d'alimenter une machine asynchrone triphasée. Les résultats obtenus par simulation numérique, sont comparés à ceux obtenus expérimentalement et sont satisfaisants. Nous notons qu'en augmentant l'indice de modulation, les harmoniques sont renvoyés vers des fréquences plus élevées, ce qui est conforme avec la théorie. L'originalité de notre travail, est dans la modularité de la réalisation du banc d'essais et du programme de simulation, ce qui nous permet d'introduire et de développer d'autres applications en changeant uniquement le module de commande.

ANNEXE A: les paramètres de la machine utilisée sont :

$R_s=5.2 \Omega$: résistance statorique	$J=6.10^{-3} \text{ Kg.m}^2$: moment d'inertie de la partie tournante
$L_s=0.625 \text{ H}$: inductance cyclique du stator	$F=2.10^{-3} \text{ N. m. s/rad}$: coefficient de frottement visqueux
$R_r=11.65 \Omega$: résistance rotorique	$U=110 \text{ V}$: tension d'alimentation continue
$L_r=0.625 \text{ H}$: inductance cyclique du rotor	$T_l=1.1 \text{ N. m}$: couple de charge constant
$M=0.604 \text{ H}$: inductance mutuelle cyclique principale	

Bibliographie

- [1] NOGUCHI T. TOMIKI H. : Direct Control of P.W.M Converter Without Power Source Voltage Sensors. IEEE Trans on Industry Applications Vol 34 n° 3. May-June 1998, pp : 473-479.
- [2] LIN B.R. LU H. H. : A Novel P.W.M Scheme for Single Phase Three Level Power Factor Correction Circuit. IEEE Trans on Industry Electronics, Vol 47 n° 2 April 2000, pp : 245-252
- [3] LABRIQUE F., BYSE H., SEGUIER G., BAUSSIÈRE R. : Les Convertisseurs de L'électronique de Puissance, Tome 5 : 'Commande et Comportement Dynamique', Lavoisier, 1998.
- [4] CHAUPRADE R., MILSANT F. : :Electronique de Puissance, tome 2: Commande des Moteurs à Courant Alternatif., Eyrolles, 1987.
- [5] REKIOUA T. : Contribution à La Modélisation et Commande Vectorielle des Machines Synchrones à Aimants Permanents. Thèse de Doctorat I.N.P.L de Nancy, 1991.
- [6] BOWES S.R., MECH M.I., MIDOUN A., :Sub-Optimal Switching Strategies for Microprocessor Controlled P.W.M Inverter Drives. IEE Proceeding B, vol. 132, Pt. B,N° 3, pp 133-148, 1985.
- [7] MOLLARD P. :Actionneur Numérique Synchrone Autopilote': Structure- Modélisation- Commande, thèse de doctorat INP de Toulouse, 1988.
- [8] CARON J.P., HAUTIER J.P. : Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone. Edition Technip 1995.
- [9] GRELLET G., CLERC C. :Actionneurs Electriques : Principe , Modèles et Commande'. Edition Eyrolles 1998.

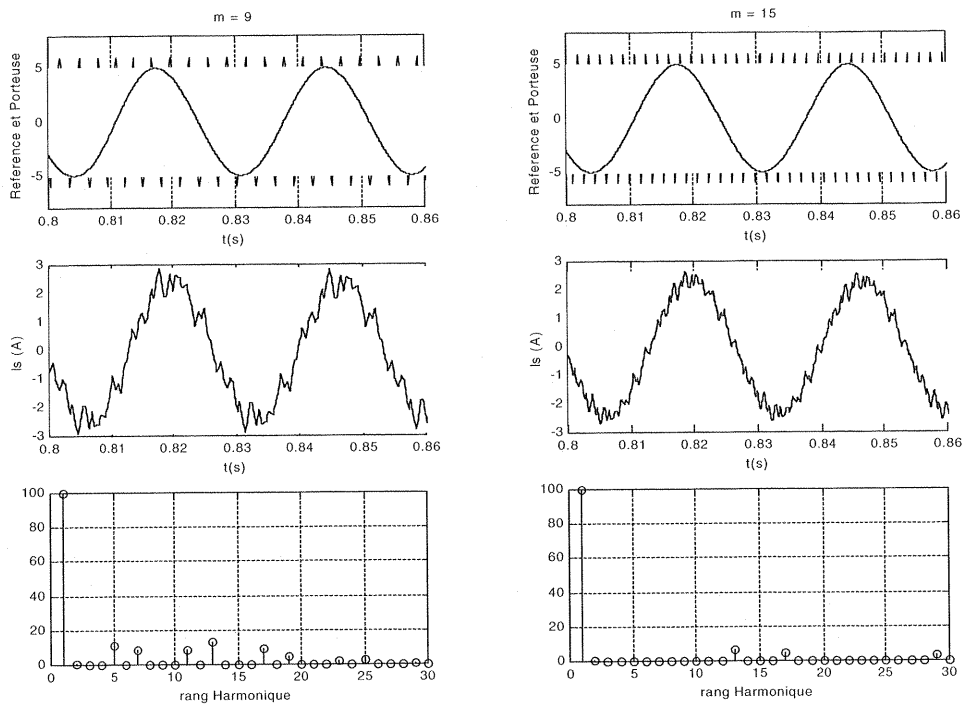


Figure 7. Résultats de simulation dans le cas de la MLI naturelle

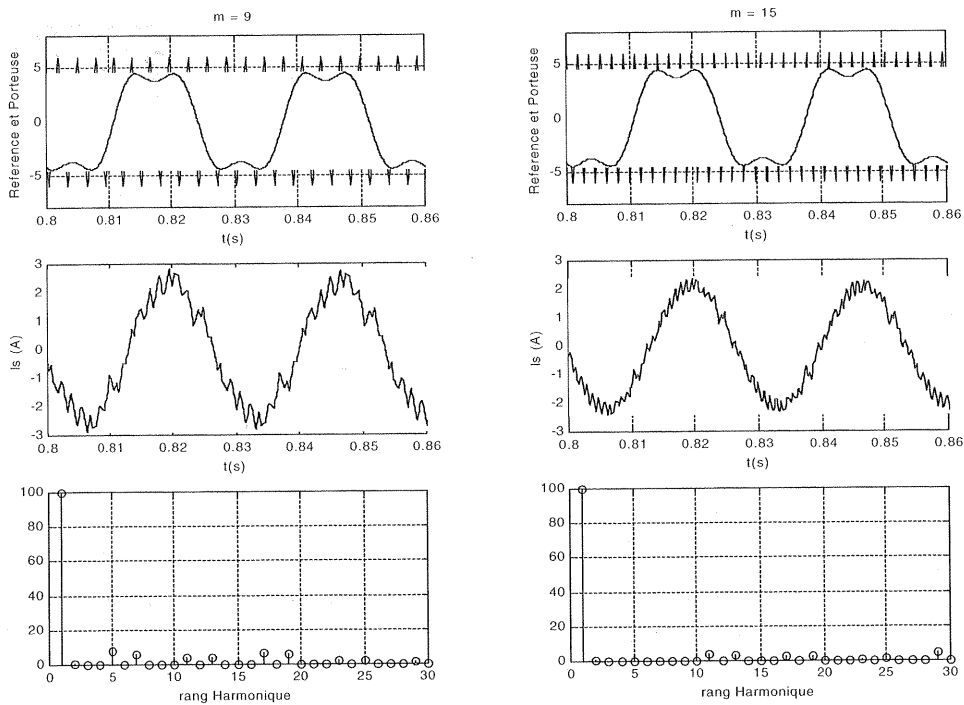


Figure 8. Résultats de simulation dans le cas de la MLI suboptimale

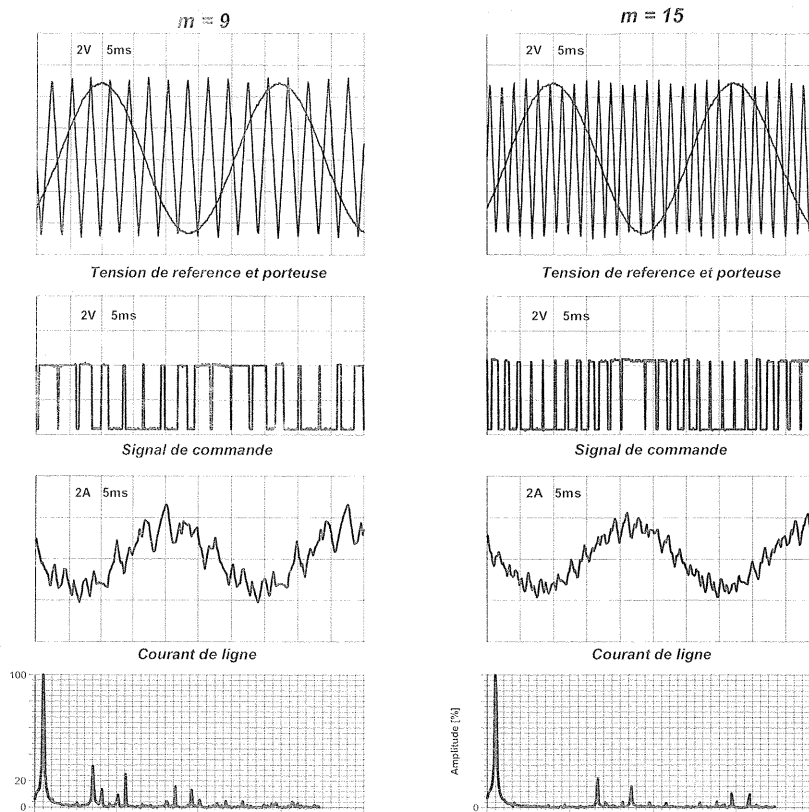


Figure 9. Résultats expérimentaux dans le cas de la MLI naturelle

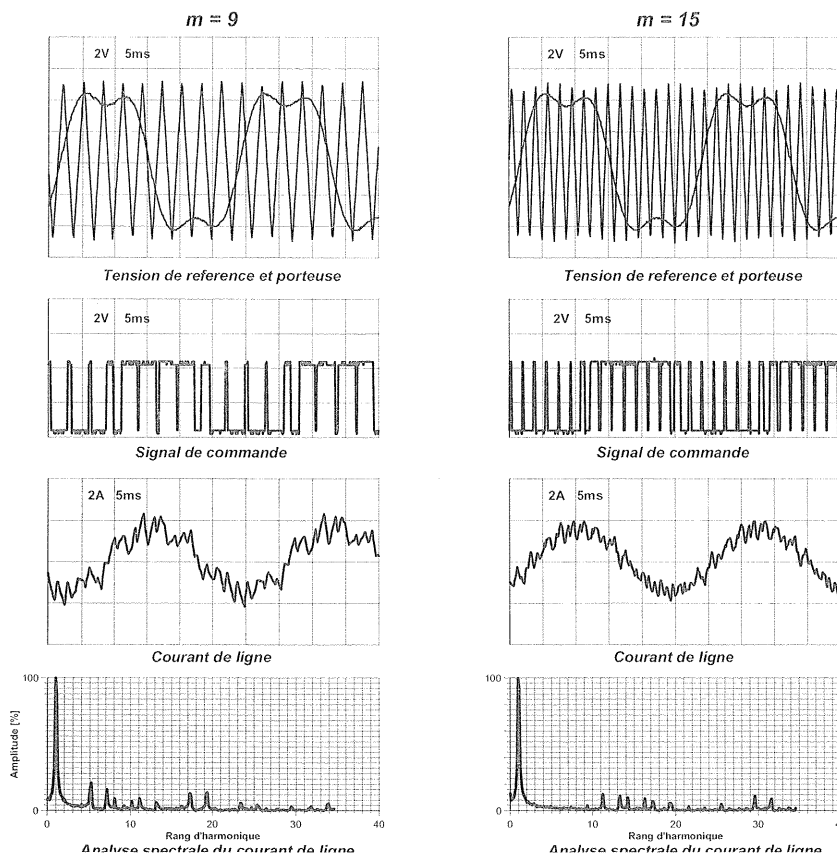


Figure 10. Résultats expérimentaux dans le cas de la MLI suboptimale

LES PREMIERS PAS DE L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE AU 19^{ème} SIÈCLE

JP. CARON, membre du comité de lecture de la revue 3EI

Chers lecteurs,

Vous ne trouverez pas d'équations, ni de graphes de causalité dans cet article, ni encore moins de précieuses démonstrations théoriques. J'ai plutôt cherché à montrer comment les Sciences peuvent devenir passionnantes quand on s'intéresse à l'histoire des hommes qui ont contribué aux grandes découvertes comme aux petites. J'ai également souhaité rendre hommage à Louis Figuier [1819-1894], génial vulgarisateur scientifique, sans qui cet article n'aurait jamais vu le jour.

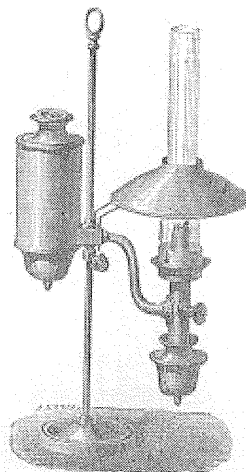
1. Petite histoire de l'éclairage avant l'usage de l'électricité [1]

Depuis l'antiquité, chez les égyptiens, les grecs et les romains, jusqu'au début du 19^{ème} siècle c'est la flamme d'une mèche de coton trempant dans l'huile végétale, contenue dans un bassin de métal ou d'argile cuite, qui assura l'essentiel de l'éclairage domestique. Dans les pays du nord de l'Europe on confectionnait des chandelles en immergeant des mèches de coton dans du suif fondu. En France, les bouchers fondaient eux-mêmes les graisses de mouton et de bœuf; une corporation de chandeliers naquit en 1016 sous le roi Philippe 1^{er}. La lanterne fut imaginée dès les premiers temps du Moyen-Age, c'était une enveloppe métallique pourvue d'une lame transparente de corne et renfermant une chandelle ou une lampe à huile.

Dans les villes, les soldats du guet accompagnaient ceux qui devaient se déplacer le soir venu et les éclairaient de leurs flambeaux. Le 7 juin 1524, un arrêt du parlement de Paris ordonna aux bourgeois de mettre des lanternes à leur fenêtre et de tenir près de leur porte un seau rempli d'eau afin de parer à toute menace d'incendie. Plus tard, La Reynie, lieutenant de police de Louis XIV, instaure en 1667 l'éclairage public en faisant installer dans les rues, places et carrefours, des réverbères à chandelle dont le service et l'entretien étaient confiés aux bourgeois de chaque quartier selon un règlement précis; les dépenses furent prises en charge par les finances royales en 1758.

Il faut attendre la fin du 18^{ème} siècle pour observer des progrès significatifs dans les systèmes d'éclairage par les corps gras liquides. En 1784, un physicien de Genève, nommé Argand, inventa la cheminée de verre et les mèches circulaires de coton; la combustion de l'huile était parfaite grâce à un double courant d'air circulant autour de la flamme. Les seules modifications qui firent suite à la mise au point du bec Argand concernaient son système d'alimentation en huile. On doit citer ici le nom d'un constructeur passé dans le langage courant, il s'agit de Quinquet qui industrialisa la

lampe à niveau constant et à réservoir latéral inventée par le chimiste Proust selon le principe du vase de Mariotte (voir fig. 1).



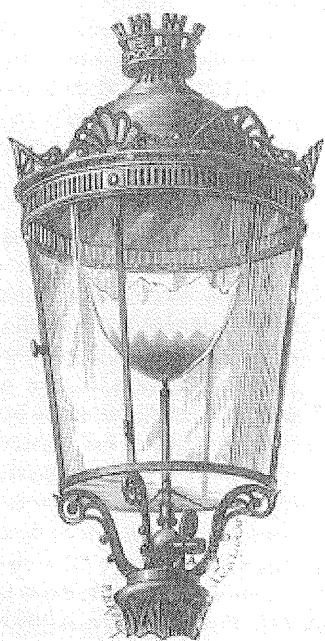
Lampe de cabinet à niveau constant.

Figure 1. Lampe à Quinquet

Toutefois ce système présente un inconvénient majeur lorsque le luminaire n'est pas fixé à un mur, c'est la formation de l'ombre du réservoir projetée dans l'espace. Un horloger parisien Guillaume Carcel plaça le réservoir d'huile dans la partie inférieure de la lampe et provoqua la remontée d'huile par un mécanisme d'horlogerie faisant mouvoir une petite pompe foulante. Un brevet d'invention fut déposé le 24 octobre 1800 et le nom de carcel devint celui de l'unité d'intensité lumineuse (voir annexe) avant même la bougie.

Alors que l'éclairage par les lampes à huile atteignait la perfection, un procédé rival allait devenir dominant: l'éclairage au gaz *hydrogène bicarboné*. C'est incontestablement à Philippe Lebon, du corps des ingénieurs des ponts et chaussées, que l'on doit l'idée d'utiliser les gaz de distillation du bois puis de la houille à des fins

d'éclairage ; il prit en 1789 un brevet d'invention pour un appareil qu'il nomma *thermolampe ou poêle qui chauffe et éclaire avec économie*. Avant qu'il n'ait eu le temps d'améliorer la qualité du gaz par un procédé d'épuration, il mourut sur les Champs Élysées percé de treize coups de couteau ; c'était le 2 décembre 1804, il revenait d'assister à la cérémonie du sacre de Napoléon 1^{er} en l'église Notre-Dame. L'industrie de l'éclairage au gaz fut ensuite développée et perfectionnée en Angleterre, puis réintroduite en France par l'allemand Winsor qui reçut le soutien du roi Louis XVIII et Paris commença à être éclairé au gaz en 1819. Les premiers candélabres au gaz apparurent place du Carrousel, rue de Rivoli, rue de la Paix et place Vendôme avant de couvrir toute la capitale au fur et à mesure de la construction des ateliers de distillation de la houille, des cuves de stockage (gazomètres) et de l'installation des conduites souterraines. Finalement en 1855, toutes les compagnies de gaz de la ville de Paris fusionnèrent pour donner naissance à la *Compagnie parisienne* qui se trouvait ainsi être propriétaire de six usines et dont la situation de monopole coûta cher aux habitants de la capitale. Les candélabres et les consoles fixées sur les murs des immeubles portaient une lanterne à l'intérieur de laquelle la flamme du gaz était protégée du vent par des carreaux de verre (voir fig. 2) ; le gaz était allumé grâce à une lampe à huile située au bout d'une perche manipulée par l'allumeur de réverbère immortalisé par les récits et chansons populaires. Le gaz d'éclairage n'était pas distribué dans toutes les localités, ni à la portée de toutes les bourses, les campagnes l'ignoraient.



Modèle conique de la lanterne à gaz de Paris.

Figure 2. Lanterne de réverbère

Heureusement qu'à la même époque un autre produit également issu de la chimie, d'un emploi facile en raison de sa consistance solide, de meilleure qualité que la chandelle, faisait son entrée dans l'économie domestique : la bougie stéarique. Fabriquée en grande quantité, distribuée dans les petits commerces, elle se répandit dans toutes les couches de la population à partir de 1840 et connut un immense succès ; de nos jours elle rend encore bien des services alors que les autres procédés ont presque disparu, tout au moins dans les pays industriellement développés. On doit au chimiste français Eugène Chevreul (1786-1889) la découverte en 1813 de l'acide stéarique qui ne sera utilisé pour la fabrication des bougies qu'à partir de 1831. Le procédé le plus ancien est basé sur la saponification des corps gras (initialement le suif) par la chaux suivie d'un traitement à l'acide sulfurique ; les divers acides gras obtenus sont ensuite séparés par un procédé complexe. Plus tard, à partir de 1846, l'acide stéarique fut préparé par l'action combinée de l'acide sulfurique et de la distillation de matières grasses de toutes origines et donc à bas prix.

Après la découverte d'importants gisements de pétrole en Amérique du nord vers l'année 1858, les huiles brutes de pétrole furent soumises à la distillation afin de séparer les nombreux constituants dont un liquide particulièrement apte à servir à l'éclairage. *L'huile éclairante de pétrole*, fabriquée en abondance et à bas prix, allait se substituer à toutes les autres huiles et même faire une sérieuse concurrence au gaz d'éclairage. Les lampes à pétrole sont d'une grande simplicité, elles conservent les trois parties essentielles des lampes à huile : le réservoir, la mèche et le verre ; le bec Argand est souvent remplacé par le *bec américain* à mèche plate, d'une construction plus simple et d'un entretien plus aisé.

2. L'arc électrique, lumière éblouissante [2]

Alors que le monde savant s'émerveillait de la découverte capitale de la pile électrique qu'Alexandre Volta venait de lui révéler, un jeune chimiste anglais, Humphry Davy, fit connaître les propriétés hilarantes du gaz protoxyde d'azote et la réputation de ses travaux lui donnèrent accès à une chaire de chimie à l'Institution royale de Londres. Ces faits se passaient en 1800, mais quels liens pouvaient exister entre eux ?

Davy fut l'un des premiers scientifiques à rattacher les phénomènes électriques à la chimie, après avoir utilisé la pile Volta pour l'analyse d'un certain nombre de corps qui se décomposent en éléments sous l'influence du courant électrique. Il isola ainsi, quelques années plus tard, le sodium, le potassium, le baryum et le calcium. Comme ses travaux réclamaient une énergie de plus en plus élevée, une puissante pile Wollaston (*cuivre* –

dissolution d'alun, acide sulfurique – zinc) fut construite en 1812 et installée dans les caves de l'Institution royale; elle occupait une place très importante car le nombre total d'éléments s'élevait à deux mille et la surface des plaques métalliques atteignait cent vingt huit mille *pouces carrés*. L'année suivante, en 1813, Davy observa que, lorsqu'on termine les deux fils conducteurs de la pile par deux pointes de charbon et qu'on les approche l'une de l'autre à environ un trentième de *pouce* de distance, une étincelle d'un très fort éclat jaillit entre les deux extrémités. Elle se maintenait lorsqu'on éloignait lentement les charbons, le jet de lumière sous la forme d'un arc (électrique) pouvait atteindre trois à quatre *pouces* de longueur avant de s'éteindre. Toute matière introduite dans ce foyer disparaissait aussitôt par fusion et volatilisation, y compris les substances les plus réfractaires; la température de l'arc aurait été, d'après M. Violle, de 3500°C. Ces mêmes phénomènes se reproduisaient dans le vide, accréditant l'hypothèse que les effets caloriques et lumineux développés par le courant électrique n'étaient pas dû à l'oxygène de l'air. L'usage d'un globe de verre hermétiquement clos, entourant les deux pointes de charbon, permettait d'accroître la durée des expériences puisque dans l'air l'arc s'accompagnait d'une combustion rapide du charbon; l'extrémité positive se creuse d'un éblouissant cratère alors que le charbon négatif, peu lumineux, se taille en pointe pendant la durée du fonctionnement. Malheureusement, en raison même de l'usure accélérée par la combustion des premiers charbons utilisés, la découverte de Davy resta longtemps une curiosité scientifique dont les expériences furent répétées dans les capitales européennes; l'industrialisation de ce procédé d'éclairage dut attendre encore trente cinq ans!

C'est Léon Foucault, l'homme du pendule, qui sortit l'arc électrique des laboratoires et des amphithéâtres de physique. Né à Paris en 1819, Léon Foucault était entré à l'Hôtel Dieu, par la voie du concours, comme élève externe afin de se consacrer à la chirurgie. Il fut attaché, comme préparateur, au cours d'anatomie microscopique du Docteur Donné, de sorte qu'après chaque leçon il préparait et réglait les microscopes pour les étudiants. En fait Léon Foucault était plus doué pour la physique et la mécanique en particulier que pour la chirurgie, ce qui allait être confirmé par la suite. Les dessins d'observation à reproduire étaient obtenus au moyen d'un microscope solaire; on projetait sur un écran l'image agrandie de l'objet étudié fortement éclairé par la concentration des rayons solaires et amplifiée par la puissante lentille de l'instrument. Les caprices météorologiques ne facilitaient aucunement les rendez-vous avec le soleil; il importait donc de lui substituer une source de lumière artificielle équivalente. C'est alors que Foucault, en 1844, eut l'idée d'améliorer le dispositif de Davy sans avoir recours à la machine à

faire le vide dont la mise en œuvre n'était pas pratique. Il porta ses efforts sur la recherche d'un charbon peu combustible à l'air. Après avoir passé en revue les nombreuses variétés de charbon, il trouva enfin celui qui allait conduire à sa renommée: le *charbon de cornue de gaz*. Ce charbon est celui qui se forme au fond des cornues ayant servi à distiller la houille pour la préparation du gaz d'éclairage. Cette sorte de coke, calciné pendant plusieurs semaines, a acquis une densité importante qui le rend peu combustible tout en devenant bon conducteur de l'électricité; ces propriétés faisaient défaut au charbon végétal jadis employé par Davy. Foucault eut aussi la chance de pouvoir disposer d'une source puissante d'électricité, à savoir la pile à deux acides du physicien allemand Bunsen (*charbon(+)-acide sulfurique dilué dix fois, acide azotique-zinc amalgamé(-)*) mise au point en 1843. L'arc électrique remplaça le soleil et le Docteur Alfred Donné publia en 1846, en commun avec Léon Foucault, un magnifique *Atlas d'anatomie microscopique* de vingt planches et quatre-vingts figures gravées.

Léon Foucault appliqua ensuite l'arc *voltaique* à l'éclairage public et le premier essai eut lieu par une sombre soirée d'hiver, en décembre 1844, devant une foule nombreuse de parisiens rassemblés sur la place de la Concorde. Assisté de l'opticien Deleuil, il disposa l'appareil d'éclairage sur les genoux de la statue de Lille située du côté de la rue Royale; les cent éléments de Bunsen étaient logés dans la petite pièce aménagée dans le soubassement en pierre de la statue. La lumière électrique était si forte qu'on pouvait lire un journal au pied du fameux obélisque et afin de maintenir son éclat les deux physiciens étaient obligés de rapprocher les supports des deux charbons en manœuvrant une crémaillère à l'aide d'un bouton. Voilà donc le défaut qui aurait pu mettre fin au développement de ce procédé d'éclairage mais c'était sans compter sur le génie inventif de Léon Foucault qui conçut l'automatisme de rapprochement des charbons.

Dans le régulateur de lumière électrique imaginé par Foucault une électrode est repoussée vers la deuxième par la force de rappel d'un système à ressort, les mettant initialement en contact. Le courant électrique traverse la bobine d'un électroaimant qui exerce une force sur le support ferromagnétique de l'un des charbons, elle a pour effet de les séparer et de provoquer ainsi l'amorçage de l'arc. Lors de la combustion des charbons la longueur de l'arc augmente et le courant diminue; il en résulte un affaiblissement de la force électromagnétique qui permet le rapprochement des charbons jusqu'à l'équilibre entre les forces et le maintien permanent de l'éclat lumineux. Ce régulateur conçu en 1848 fut perfectionné par de nombreux constructeurs aussi bien en France qu'à l'étranger, le plus connu d'entre eux est le régulateur

Serrin (voir fig. 3) amélioré par un savant mécanisme d'horlogerie. Il devait être utilisé même après la mise au point industrielle de la bougie Jablochkoff en 1876 qui devait rendre son usage obsolète.

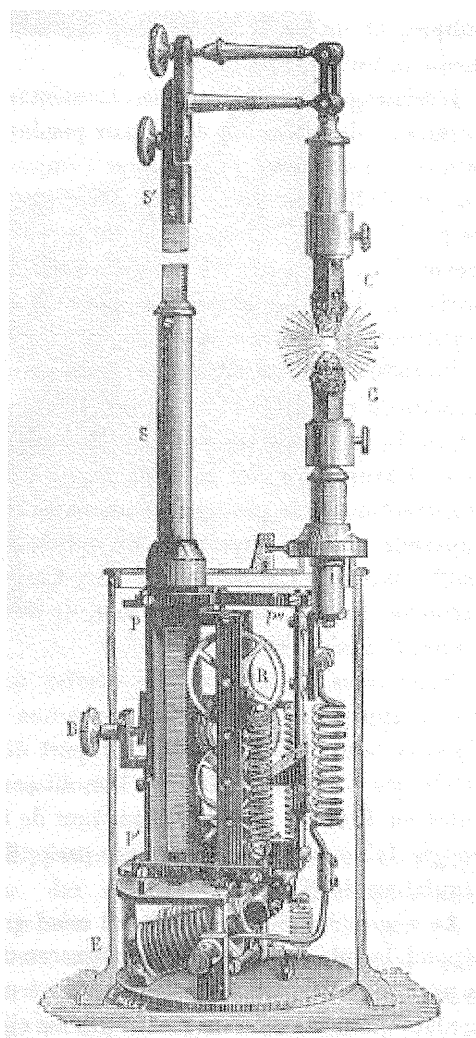


Figure 3. Régulateur Serrin

Des expériences d'éclairage par l'arc électrique furent présentées à Paris et dans de nombreuses villes de province ; on l'utilisa même pour effectuer des travaux de nuit et pour remplacer l'éclairage à huile dans les phares. Mais à l'époque de la mort de Léon Foucault survenue le 11 février 1868, l'éclairage électrique n'avait guère progressé puisqu'on lui reprochait de délivrer une *lumière éblouissante*, ne convenant pas à un usage domestique et de nécessiter l'emploi coûteux et délicat du régulateur. Les propos tenus par des scientifiques n'étaient absolument pas encourageants ; dans leur cours de physique publié en 1869, messieurs Boutan et d'Almeida ne déclarèrent-ils pas : « *La lumière de l'arc voltaïque a été bien souvent essayée pour l'éclairage des villes*

et jusqu'ici elle l'a été sans succès... Ces petits soleils disséminés sur les places et dans les carrefours fatigueront les habitants, éblouis par l'éclat insupportable d'une lumière aussi vive. On demandera à revenir immédiatement au mode actuel d'éclairage. On pourrait, à la vérité, amortir l'éclat par des verres dépolis ; mais alors la perte serait considérable, et comme la production d'électricité est très coûteuse, nous ne voyons pas trop l'avantage qu'il y aurait à substituer cette lumière affaiblie à celle du gaz. »

Dans cette période d'incertitude quant à l'avenir de l'arc voltaïque, un savant russe Paul Jablochkoff allait véritablement créer l'industrie de l'éclairage électrique. Né à Serdobsk en 1847, il fit ses études à l'École du génie militaire de Saint Pétersbourg puis devint directeur d'une ligne télégraphique à l'issue de son service militaire. Il put alors se consacrer à divers travaux pratiques d'électricité dont la surveillance et la maintenance d'appareils d'éclairage de la voie ferrée entre Moscou et Kursk. Autorisé à se rendre à l'Exposition universelle de Philadelphie en 1876, il interrompit son voyage à Paris à la suite de sa rencontre avec le constructeur Antoine Bréguet qui mit ses ateliers à sa disposition afin d'y développer une invention révolutionnaire. Il s'agissait tout simplement (encore fallait-il en avoir l'idée !) de supprimer le régulateur en faisant éclater l'arc électrique entre les extrémités de deux baguettes de charbon disposées parallèlement l'une en face de l'autre. Elles sont séparées d'une substance isolante à froid, telle le plâtre ou le kaolin, et qui devient conductrice de l'électricité quand on la chauffe. Après l'amorçage de l'arc entre les extrémités supérieures par suite de la combustion d'une amorce, la chaleur dégagée fait fondre et volatiliser le plâtre ou le kaolin au fur et à mesure de la combustion des charbons du haut vers le bas comme le fait une bougie ordinaire. Tout irait bien si le pôle positif ne brûlait pas deux fois plus vite que le pôle négatif, phénomène qui conduisait inexorablement à l'extinction de la bougie avant sa combustion complète. C'est dans les ateliers Bréguet que Jablochkoff trouva la solution au problème posé par l'alimentation à base des piles Bunsen ; il y découvrit la machine magnéto-électrique construite pour la compagnie l'*Alliance*, sorte d'alternateur à aimants naturels déjà utilisée dans les phares. En produisant un courant alternatif dans sa bougie alimentée par cette machine, les charbons alternativement positifs et négatifs s'usent à la même vitesse. Les bougies Jablochkoff (voir fig. 4) sont enfermées dans un globe de verre dépoli qui atténue leur éclat ; elles sont au nombre de cinq ou six, posées sur un porte-charbon solidaire d'un disque mobile actionné par un ingénieux commutateur qui permet le remplacement automatique d'une bougie, quand elle est consumée, par une autre.

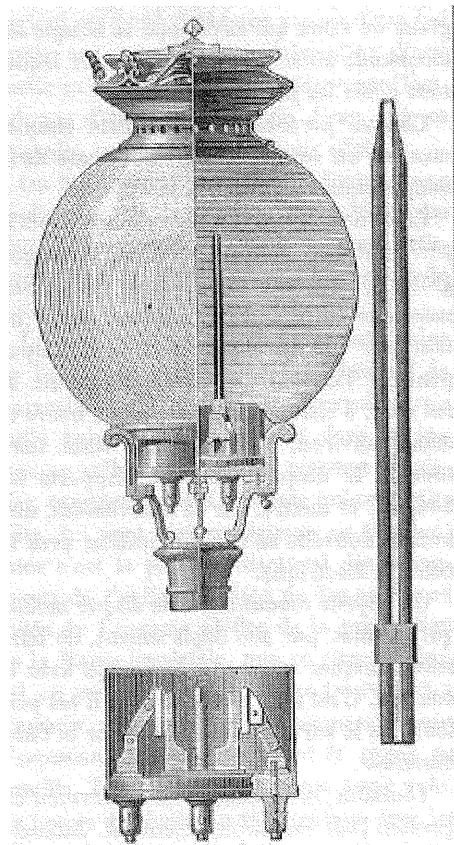


Figure 4. Bougie Jablochhoff, globe et porte-charbon

Une bougie Jablochhoff de 25 cm de long et de 4 mm de large dure 90 minutes ; avec le kaolin la lumière est légèrement rosée alors qu'elle est blanche avec le plâtre.

C'est cette invention qui décida du développement de l'éclairage électrique des lieux publics ; l'événement fondateur se produisit le 31 mai 1878 dans un lieu prestigieux au cœur de Paris. Vers neuf heures du soir, l'avenue de l'Opéra fut illuminée par la mise en service simultanée de trente deux candélabres équipés de bougies Jablochhoff. La démonstration fut suivie par l'installation de ce système et d'autres similaires pour l'éclairage des avenues et places, des hôtels de luxe, des usines, des grands magasins et théâtres où l'éclairage au gaz avait souvent provoqué des incendies causant la mort d'un grand nombre de victimes. Mais, pour que l'électricité pénétrât enfin les foyers domestiques, petits ateliers et commerces, il fallut attendre l'introduction en Europe (1882) de la *lampe à incandescence* d'Edison et la création de véritables réseaux de distribution de l'énergie électrique groupés en *secteurs* alimentés par autant de *centrales* autonomes de production.

3. L'incandescence ou la lumière douce [2], [3], [4], [5]

L'incandescence est l'état d'un corps qu'une température élevée rend lumineux (dictionnaire Larousse) ; cette propriété peut être obtenue électriquement par l'effet Joule produit dans un conducteur de charbon réduit à l'état de fil, placé dans une cloche de verre privée d'air et alimenté par une pile. La *lampe à charbon et à incandescence dans le vide* fut réalisée par de nombreux physiciens sans que le stade de l'industrialisation soit atteint. Parmi les premiers créateurs on peut citer l'américain J.W. Starr (1845), le tourangeau M. de Changy (1858), ingénieur des mines vivant à Bruxelles.

Après la présentation publique de son système d'éclairage à l'Institution royale en présence de Michael Faraday, J.W. Starr fit prendre un brevet par son ami King et s'en retourna en Amérique ; pendant le voyage du retour on le retrouva mort dans sa cabine (suicide ou meurtre ?) et sa découverte n'eut pas de suite immédiate. M. de Changy s'intéressait à l'éclairage des galeries de mines en toute sécurité face au danger des coups de grisou. Après de nombreux essais sur le charbon de cornue de gaz et des métaux comme le platine, il utilisa une spirale de platine enroulée autour d'un bâtonnet de charbon, inventant par là même la division de la lumière électrique qu'il généralisa en alimentant plusieurs lampes en parallèle sur une pile Bunsen sans que l'éclat de chacune d'elles fût modifié selon le nombre de lampes mises en service. L'Académie des Sciences ne fit pas bon accueil aux travaux de M. de Changy qui avait eu l'audace d'espérer une retombée financière en récompense de ce que lui coûtait en temps et en argent sa recherche. Elle lui fit comprendre qu'il ne méritait pas le nom de savant car *voulant faire de son invention un objet de lucre* ; dépité, M. de Changy cessa d'exploiter son brevet. C'est encore à Paris que des ingénieurs russes essayèrent de mettre au point des lampes à incandescence avec des crayons de charbon de cornue de gaz, mais ils se désagrégèrent et tombaient en morceaux ; ils échouèrent alors que leur compatriote Jablochhoff triomphait avec sa bougie. L'éclairage par incandescence éprouvait donc de grandes difficultés à se perfectionner jusqu'au jour où l'américain Thomas Alva Edison (voir fig. 5) parvint à concevoir un produit fiable et performant.

La vie active d'Edison [1847-1931] commença de bonne heure puisqu'il dut gagner son pain dès l'âge de 12 ans en vendant des fruits, des journaux et des magazines illustrés à bord du train *Canada and Central Michigan*. Très débrouillard et ingénieux, il s'initia à la manœuvre du télégraphe électrique et obtint à 16 ans une place d'employé de nuit dans les bureaux du télégraphe du chemin de fer de Michigan. Il s'adonna à de multiples expériences

comme l'expédition croisée par un même fil de deux dépêches en sens inverse ou encore la télégraphie entre deux trains en marche. Comme ses travaux engendraient parfois des incidents et des dysfonctionnements de service, le directeur du chemin de fer le licencia. Après quelques années de 'petits boulots', il s'affirma comme excellent technicien et même inventeur puisqu'il déposa en 1868 un brevet d'une machine à voter automatique.



Figure 5. Portrait d'Edison

Engagé comme ingénieur par l'Union des Télégraphes de l'Ouest (Western Union) il s'entourait d'une bonne équipe de mécaniciens : l'anglais Charles Batchelor, le suisse John Kuesi et l'américain John Ott qui lui restèrent fidèles tout au long de leur aventure industrielle. En 1874 il déposait plusieurs brevets sur les télégraphes duplex et quadruplex et en 1876, après avoir complété son équipe par un scientifique diplômé en physique de l'université de Princetown : Francis R. Upton et un habile souffleur de verre allemand : Ludwig K. Boehm, il quittait Newark pour fonder à Menlo Park, entre New-York et Philadelphie, un très grand laboratoire qui deviendra une véritable usine à penser. C'est alors qu'Edison se révéla être un inventeur-entrepreneur moderne, pionnier de la grande société industrielle américaine, sachant motiver son personnel, possédant l'intuition de l'invention, attirant les capitaux pour le développement et utilisant la presse écrite au mieux de ses intérêts. Le laboratoire de Menlo Park était une vaste ruche où s'activèrent jusque deux cents employés. Dans un ouvrage publié en 1882 par M.P. Bacué, on peut lire une description de l'univers Edison dont voici un extrait :

« Dans ce laboratoire gigantesque, travaillent des préparateurs appartenant à diverses spécialités industrielles ou scientifiques, occupés à suivre des expériences commencées souvent depuis plusieurs mois. Il y a là des chimistes, des physiciens, des électriciens, des mécaniciens, et jusqu'à un mathématicien chargé de réduire algébriquement certaines expériences, et d'en donner la forme abstraite. Quelques aides d'une capacité moins haute, moins remarquables par leurs aptitudes, exécutent ce que j'appellerais les travaux manuels. Voici le mode de procéder adopté par Edison et qui mérite d'être mis en lumière. Il prend une substance quelconque, le charbon, par exemple, dans lequel il a découvert des propriétés et une sensibilité que personne avant lui n'avait soupçonnées ; il la met dans la main de chacun de ses aides, en lui donnant une tâche différente et en rapport avec ses aptitudes. L'un doit la soumettre à l'action de la chaleur, l'autre à celle de la lumière, celui-ci à celle de l'électricité, celui-là au son, etc., dans les conditions les plus variées, et chacun est tenu d'enregistrer scrupuleusement les phénomènes dont il est témoin. »

Après l'installation à Menlo Park, deux découvertes importantes virent le jour en 1878 : le phonographe et la capsule microphonique au carbone dont les droits de fabrication et d'exploitation furent finalement vendus à Alexander Graham Bell. Cependant Edison songeait déjà à s'occuper de la question de l'éclairage électrique et il résolut alors de traiter à fond toutes les questions que soulevait l'application de l'électricité à l'éclairage public et privé ; son plan excluait naturellement l'arc électrique. Il mit sur pied un système complet d'éclairage, du générateur - la dynamo Edison bien sûr - aux lampes en passant par la distribution et la subdivision de l'énergie électrique et en poursuivant même jusqu'à la promotion commerciale. Edison s'efforça d'abord à réaliser un meilleur vide dans les lampes à incandescence que ne l'avaient fait ses prédécesseurs. Il disposa de la pompe à mercure de Sprengel et constata que même les gaz dissous dans le platine ou le charbon étaient évacués, augmentant ainsi la dureté du filament et son éclat. Il fit l'essai d'un grand nombre de fibres végétales carbonisées et envoya ses collaborateurs dans le monde entier afin de dénicher le meilleur produit qui s'avéra être le bambou du Japon. Les tiges de bambou étaient conditionnées en baguettes de 12 cm de long et de 1 mm d'épaisseur puis on les recourbait pour leur donner la forme d'un U allongé, et après calcination on obtenait un filament de charbon de la grosseur d'un crin de cheval. Le filament était disposé à l'intérieur d'une ampoule de verre, ses extrémités attachées à deux fils de platine destinés à l'alimentation en courant. La cloche était ensuite fermée du côté support par un bouchon de plâtre alors que son sommet prolongé par un petit tube de

verre était relié à la machine de Sprengel. Quand l'air fut chassé, la flamme d'un chalumeau faisait fondre le petit tube et la cloche se trouvait ainsi hermétiquement close.

C'est le 21 octobre 1879 que l'on put admirer pour la première fois la lumière délivrée par la lampe Edison (voir fig. 6) dont le filament de coton dura un peu plus de 13 heures ; ce n'est pourtant qu'au printemps 1881 que le carbone-bambou fut utilisé et la fabrication en série lancée. Un autre américain connu beaucoup de succès avec une lampe construite sur des principes différents : l'ampoule n'était pas vide mais remplie d'un gaz impropre à la combustion, un carbure d'hydrogène dénommé *gazoline* ; le filament était formé d'un morceau de bristol carbonisé de la forme d'M. Cet américain s'appelait Hiram Maxim et il passa à la postérité grâce à l'invention d'une mitrailleuse automatique de 7,7 mm, de 2000 mètres de portée et délivrant des rafales de 600 balles à la minute (1895).

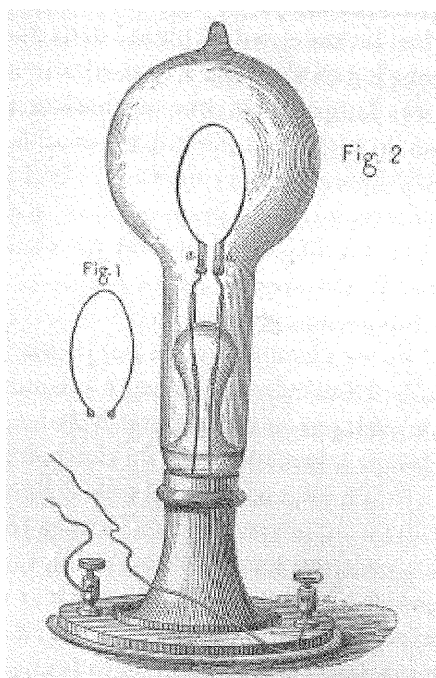


Figure 6. Filament (1) et lampe d'Edison (2)

4. L'électrification en marche [2], [4], [5], [6]

En 1881 se tint à Paris l'Exposition Internationale d'Électricité, elle fut considérée plus tard comme l'événement scientifique et industriel majeur du 19^{ème} siècle. Le grand escalier allant de la nef aux galeries du premier étage resplendissait sous la lumière des lampes Edison et Swan ; il conduisait à deux grandes salles où les visiteurs pouvaient s'extasier devant les inventions et les matériels produits par les sociétés Edison : télégraphes, téléphones, phonographes, instruments de précision,

électro-aimants diviseurs de minerais, etc., mais c'est surtout le système d'éclairage qui fit la plus forte impression. Le triomphe fait à Edison s'expliquait également par la manipulation systématique de l'opinion publique à laquelle s'employèrent ses collaborateurs. Ils achetèrent la presse comme en témoignent par exemple le portrait élogieux publié dans *l'Illustration* du 1^{er} octobre 1881 et la place offerte au rédacteur en chef du *Figaro* dans les sociétés Edison ; des scientifiques furent également concernés, ainsi le comte Théodore de Moncel et Camille Flammarion percevaient mille francs par mois. Après l'exposition, Edison implanta en France trois sociétés de production et de distribution de l'électricité : la Compagnie Continentale Edison, la Société Industrielle et Commerciale Edison et la Société Électrique Edison.

En Amérique le *sorcier de Menlo Park* appliqua pour la première fois ses idées sur l'électrification à la ville de New-York, dans la partie sud du quartier de Manhattan entre l'East River et Broadway. Une centrale thermique fut installée au 257 Pearl Street ; six machines à vapeur entraînaient autant de dynamos (voir fig. 7) qui délivraient au maximum 500 ampères sous 103 volts. Tout le quartier, sur une surface d'environ un kilomètre carré, fut mis en chantier pour recevoir les câbles souterrains et les premiers bénéficiaires furent la finance et la presse ; à la fin de l'année 1882, 231 clients étaient raccordés pour un ensemble de 3400 lampes, un peu plus tard 10000 lampes étaient alimentées. On peut juger de l'expansion de l'éclairage électrique outre Atlantique par les informations fournies en 1885 dans le journal *l'Électricien* : « Il y a actuellement près de 176400 lampes Edison en fonction dont 494 installations privées comptant ensemble 125000 lampes et 51400 lampes alimentées par des stations centrales distribuées dans 24 villes ».

En France, malgré l'engouement populaire pour la nouveauté, l'usage de l'électricité est longtemps resté un *luxe charmant* ; la *fée Électricité*, malgré les atouts de sa séduction, ne dégelait pas le portemonnaie des consommateurs privés. L'éclairage électrique public connut quelques vicissitudes dans la capitale en raison de la discorde qui régnait entre la ville et la Compagnie Jablochkoff à propos du prix à payer. La lumière électrique quitta même les rues de Paris en 1882 pour n'y revenir qu'en 1888 ; seules des centrales privées étaient construites dans les sous-sols des grands magasins, des hôtels de standing, de l'Hôtel de Ville et des théâtres. L'installation la plus imposante fut celle de l'Opéra de Paris où l'on remplaça pas moins de huit mille becs de gaz ! Huit chaudières alimentaient neuf machines à vapeur qui délivraient la force motrice à douze dynamos Edison et à une dynamo Gramme à courants alternatifs ; l'éclairage était assuré par 5000 lampes de 10 bougies, 1000 lampes de 16 bougies

chacune et 24 foyers Jablochhoff, l'installation fut achevée en 1887.

En province les expériences se multipliaient soit à partir de machines à vapeur agricoles servant habituellement aux battages, soit par l'utilisation de la force motrice des roues à aubes des moulins. Je cite ici le cas de la ville de Bourgneuf qui fut une ville pionnière en matière d'éclairage public et où j'ai pris plaisir à visiter son *Musée de l'Électrification* en septembre 2000. Dans cette sous-préfecture creusoise, qui comptait alors quatre mille habitants, fut inauguré l'éclairage public le 9 mai 1886 ; « ...il comprend, outre 60 lanternes municipales, l'éclairage complet de la mairie avec une vingtaine de lampes, de l'église avec 7 lampes, des cafés, hôtels, magasins, etc., soit un total actuel de 106 lampes allumées et une installation prévue pour 300 lampes environ » (d'après E. Hospitalier, chroniqueur de *l'Électricien*). Une roue, de cinq mètres de diamètre, effectuait six révolutions par minute sous l'effet d'une chute d'eau de 11 mètres ; elle entraînait une dynamo Thury à trois paires de pôles, sa vitesse de rotation était de 450 tr/min et elle délivrait 180 ampères nominaux sous 110 volts. Toutes les lampes Woodhouse et Swan de dix bougies chacune étaient allumées simultanément à partir de la centrale et les usagers ne pouvaient utiliser le courant que pendant la période d'éclairage public. Un quart de siècle plus tard, le nombre de lanternes n'aura progressé que de 50% malgré l'extension de la ville. Les ouvriers papetiers, travaillant dans le *périmètre de l'octroi*, réclamèrent l'installation de cinq becs électriques supplémentaires par une pétition adressée au conseil municipal en octobre 1912 :

« ...Nous avons bien droit à une part de la lumière que vous prodiguez aux bourgeois et aux commerçants de la ville. La lumière que nous vous demandons n'est pas destinée à éclairer nos promenades nocturnes, mais bien à faire chemin que notre situation d'ouvriers nous oblige à franchir plusieurs fois par jour dans l'obscurité. Si les charges sont pour tous, il est bien juste que tous profitent des avantages quelle que soit la situation modeste qu'ils occupent dans la société ».

Edison sortait vainqueur de la bataille de l'éclairage mais un conflit plus rude allait éclater entre Edison, soutenu en France par Marcel Déprez, et Tesla encouragé par Westinghouse aux États-Unis : le CONTINU contre l'ALTERNATIF.

C'est une autre histoire qui commençait...

Annexe

(sur l'unité d'intensité lumineuse)

Par définition, l'intensité d'une source lumineuse dans une direction donnée est le rapport du flux lumineux (puissance) à l'angle solide élémentaire du cône dans lequel il est émis par la source.

Afin de comparer l'éclat des lampes (à huile) entre elles, une référence fut introduite ; c'était le *carcel* caractérisant la 'puissance' d'une lampe brûlant 42 grammes d'huile par heure. Puis avec l'arc électrique on a eu recours au *violle* qui est l'intensité lumineuse émise dans une direction normale par 1 centimètre carré pris à la surface d'un bain de platine en fusion, un violle valait sensiblement deux carcels. Cette intensité était trop grande pour les besoins de la pratique, on a choisi pour unité la *bougie décimale* (bd) qui vaut $1/20^{\text{ème}}$ de violle. Celle-ci était représentée, pratiquement, par une fraction déterminée de la moyenne des intensités moyennes, mesurées perpendiculairement à l'axe, d'au moins cinq étalons secondaires, constitués par des lampes électriques à incandescence conservées dans les laboratoires nationaux de France, des USA et d'Angleterre (Laboratoire Central d'Électricité (F), National Bureau of Standards (USA), National Physical Laboratory (GB)) et soumis à des vérifications périodiques. Cette unité arbitraire était contestée par les allemands qui avaient adopté la bougie Hefner équivalente à 9/10 de la bougie décimale. Les lampes de l'étalon secondaire s'altérant à la longue, la méthode assurant la pérennité de l'unité légale est établie par référence au corps noir, pris comme étalon primaire.

L'unité légale d'intensité lumineuse est, à partir du 1^{er} janvier 1948, la *bougie nouvelle*, devenue ensuite la *candela* (cd) ; c'est la soixantième partie de l'intensité lumineuse, dans la direction normale à sa surface, d'une source de 1 centimètre carré constituée par un corps noir (radiateur intégral) porté à la température de solidification du platine (1755°C), placé dans un creuset de thorine et chauffé par induction.

Aujourd'hui et depuis la 16^{ème} conférence générale des poids et mesures (1979), la candela est définie par l'intensité lumineuse d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540 THz et dont l'intensité énergétique est de 1/683 watt par stéradian dans la direction considérée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Louis Figuier, « *L'art de l'éclairage* », Ed. Furne, Jouvet et Cie, Paris 1882
- [2] « *Louis Figuier, les merveilles de l'électricité* », Textes choisis et présentés par Fabienne Cardot, Association pour l'Histoire de l'Électricité en France, Paris 1985
- [3] E. Hospitalier, « *Les principales applications de l'électricité* », Ed. Masson, Paris 1881
- [4] A. Beltran, « *La fée Électricité* ». Découverte Gallimard, Paris 1991
- [5] « *Les cahiers de science & vie – Grands Ingénieurs – Thomas Edison* », n°32 hors série, avril 1996
- [6] M. Robert, « *L'eau et la lumière – Bourgneuf en Limousin* ». Éditions SELM (Société d'Ethnographie du Limousin et de la Marche), Limoges 1998

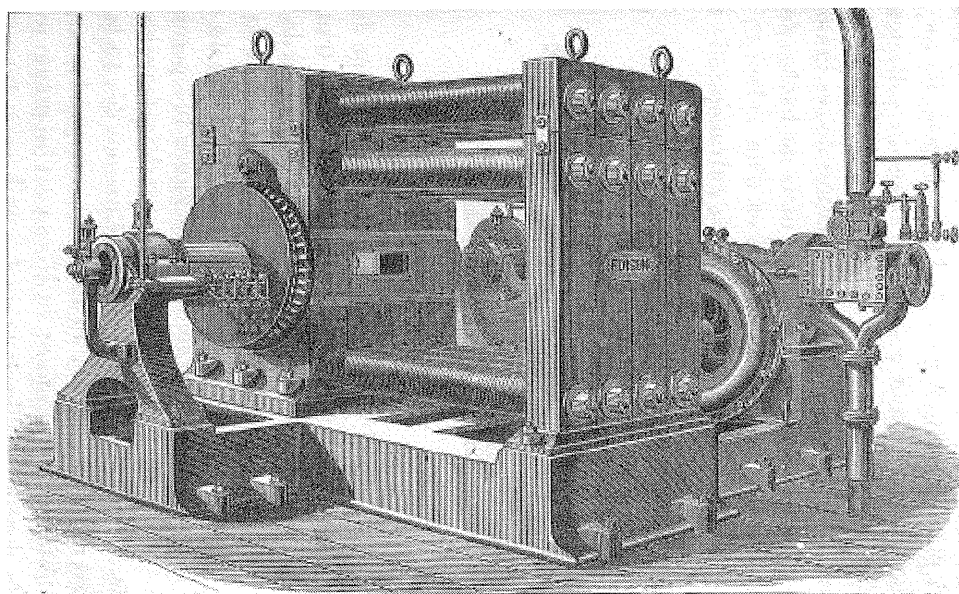


Figure 7. Dynamo 'à vapeur' d'Edison (Pearl Street)

LUMIERE ET ENVIRONNEMENT VISUEL

Jean Jacques DAMELIN COURT

CPAT 118 Route de Narbonne,
31062 Toulouse CEDEX 4
damelincourt@cpa22.ups-tlse.fr

Pascal LOOS

GREEN UHP, Faculté des Sciences, BP 239
54506 VANDOEUVRE CEDEX
Pascal.Loos@green.uhp-nancy.fr

I - LUMIERE ET SYSTEME VISUEL

I.1 - Le rayonnement lumineux

Le rayonnement électromagnétique trouve son origine dans l'accélération des particules chargées, ce phénomène pouvant lui-même apparaître dans des situations extrêmement diverses, circulation d'un courant dans une antenne, élévation de la température d'un corps, décharge électrique, etc. On peut généralement se ramener à une évolution sinusoïdale des grandeurs caractéristiques du rayonnement électromagnétique. On caractérise alors ce rayonnement par sa fréquence ν ou par une des grandeurs qui sont liées à la fréquence, énergie ou longueur d'onde λ (mais qui dépend aussi du milieu).

La longueur d'onde est liée à la fréquence par la relation $\lambda = \nu/V$ où ν est la vitesse de la lumière qui vaut sensiblement $3 \cdot 10^8$ m/s dans le vide (et, pratiquement dans l'air). L'énergie d'un photon, quantité élémentaire d'énergie rayonnée, vaut $h\nu$, c'est à dire $6,626 \cdot 10^{-34} \nu$ en Joules si ν est en Hertz. Il faut donc recevoir $2,26 \cdot 10^{18}$ photons bleu par seconde pour recevoir une puissance de 1 Watt.

L'ensemble des rayonnements électromagnétiques forme un spectre ininterrompu dans l'échelle des fréquences. La figure I-1 indique les dénominations les plus courantes des radiations de ce spectre.

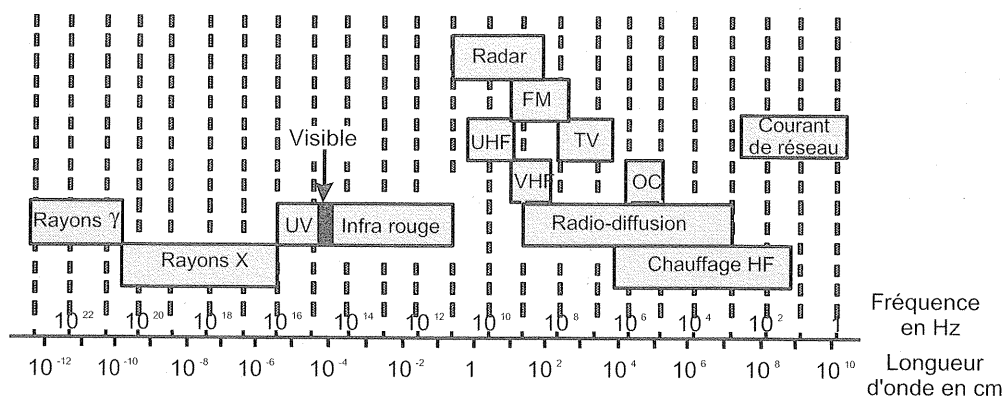


Figure I.1: Composition du spectre électromagnétique

Les fréquences visibles, c'est à dire susceptibles d'impressionner les récepteurs de l'oeil humain, sont sensiblement comprises entre $3,95 \cdot 10^{14}$ et $7,9 \cdot 10^{14}$ Hz c'est à dire entre 395.000GHz et 790.000 GHz.

Ces fréquences correspondent respectivement à des longueurs d'ondes de $760 \cdot 10^{-9}$ m et $380 \cdot 10^{-9}$ m c'est à dire 760 nm (nm = nanomètres) et 380 nm. On peut aussi les exprimer en μ m (micromètres = 1000 nanomètres), soit 0,76 μ m et 0,38 μ m.

Afin de clarifier un vocabulaire longtemps imprécis, la réglementation a cherché à définir les limites des rayonnements ultraviolet et visible. On utilise généralement les subdivisions des tableaux I.1.a et I.1.b.

Le rayonnement ultraviolet est divisé en 3 bandes correspondant à des photons de plus en plus énergétiques alors que l'on a attribué au spectre lumineux huit bandes colorées dont les limites (plus ou

moins arbitraires) sont codifiées par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE).

Bandes	Type d'UV	Limites des bandes
A	mous	315 à 400 nm
B	moyens	280 à 315 nm
C	durs	100 à 280 nm

Tableau I.1 a : Définition des 3 types d'UV

Bandes	Couleurs	Limites des bandes
1	Violet foncé	380 à 420 nm
2	Violet	420 à 440 nm
3	Bleu	440 à 460 nm
4	Bleu-vert	460 à 510 nm
5	Vert	510 à 560 nm
6	Jaune	560 à 610 nm
7	Orange	610 à 660 nm
8	Rouge	660 à 760 nm

Tableau I.1.b : Définition des 8 bandes du spectre lumineux

I.2 - De la source au système visuel

Lorsque le rayonnement électromagnétique rencontre la matière (gaz, liquide, solide) il interagit avec elle et s'en trouve modifié. Le rayonnement peut être réfléchi, transmis, absorbé, diffusé, diffracté... en totalité ou partiellement. Ce point est très important puisque c'est en lui que réside la possibilité de percevoir notre environnement visuel: le système visuel interprète les modifications qu'impose la matière au rayonnement émis par la source.

Ce rayonnement modifié influence le système visuel à travers une chaîne de transmission qui comprend :

- un système optique constitué d'un diaphragme réglable (la pupille), d'une lentille à focale variable (le cristallin), de détecteurs (cônes et bâtonnets) répartis de façon très hétérogène sur la rétine. La figure 1a donne la structure générale de l'oeil ainsi que la distribution des récepteurs sur la rétine.

- un système de codage et de compression des signaux lumineux réalisé à partir d'interconnexions horizontales entre cellules nerveuses de la rétine.

- un système de stockage et d'interprétation des éléments codés (système nerveux central) pour

lequel l'éducation visuelle de l'individu jouera un rôle important.

Ainsi, la perception de notre environnement visuel résulte de l'interaction de trois "éléments" :

- la ou les sources qui produisent le rayonnement. Elles peuvent être naturelles (ciel, soleil) ou artificielles (flammes, lampes d'éclairage)

- les objets ou plus généralement les matériaux, qui réfléchissent, transmettent et en définitive transforment la lumière émise par les sources.

- le système visuel qui traite l'information disponible sous forme lumineuse.

I.3 - Constitution et principales propriétés de l'oeil

L'oeil a sensiblement la forme d'un globe (figure I.2.a). Il est entouré d'une membrane externe dure, la sclérotique, prolongée en avant par une fenêtre transparente plus bombée, la cornée. Une membrane interne riche en vaisseaux sanguins, la choroïde, est continuée en avant par l'iris percé d'un trou central de diamètre variable, la pupille.

L'image est formée sur le récepteur de l'oeil, la rétine, par le cristallin qui se comporte comme une lentille à focale variable dont la courbure est commandée, par l'intermédiaire d'un réseau de fibres, par les muscles ciliaires. La rétine, considérée comme un prolongement du cerveau, se présente comme une membrane transparente. La cornée, les humeurs transparentes aqueuse et vitrée, contribuent à la convergence des rayons lumineux. A l'état de repos des muscles ciliaires, le cristallin est tendu par les fibres, la courbure est faible et l'oeil accommode à l'infini (plus de 5m), sa puissance est alors voisine de 60 dioptries chez l'adulte (soit une distance focale f de 1/60 m soit 16,7 mm). Lorsque le muscle ciliaire se contracte, les fibres se détendent et la courbure augmente, l'oeil accommode sur des objets plus proches, sa puissance peut alors atteindre 68 dioptries ($f = 14,7$ mm). La modification de la convergence est réglée par le cerveau à partir des déformations de l'image qu'entraîne la défocalisation et des différences d'images résultant de la vision binoculaire. Cette faculté d'adaptation se dégrade fortement avec l'âge.

L'examen de la figure I.2.b montre la distribution très particulière des cônes et des bâtonnets. Ces récepteurs, qui diffèrent dans leurs formes, présentent aussi des réponses spectrales très différentes. Alors que la réponse des bâtonnets est unique avec un maximum situé près de 500nm, on note pour les cônes trois types de réponses possibles. Ces réponses centrées dans le bleu, le jaune vert et l'orangé rouge se recouvrent largement, elles permettent la perception des couleurs et sont responsables du phénomène de métamérisme (cf. §1.4.2). La répartition

de ces deux familles de cellules, cônes et bâtonnets, définit deux zones aux propriétés très différentes. Une première zone, qui représente la quasi-totalité de la surface rétinienne, est couverte essentiellement de bâtonnets avec une faible densité de cônes. Cette zone permet une détection des faibles luminosités mais ne permet pas la vision précise. Une seconde zone, de faible étendue angulaire (de l'ordre du degré d'angle), situé sur l'axe optique et ne comportant que des cônes, est responsable de la vision précise et de la vision des couleurs ou vision photopique (il faut noter que les cônes ne commencent à répondre que pour des luminances supérieures à $0,1 \text{ Cd/m}^2$). Cette zone détectrice de petite dimension, associée à la pupille, également de petite dimension, fait que l'oeil n'est en général sensible qu'à la grandeur lumineuse qui représente la densité de flux lumineux par stéradian et par unité d'aire de surface vue (ceci n'est plus vrai pour des sources de petites dimensions ou éloignées).

Les cônes sont directement raccordés aux fibres du nerf optique par des liaisons radiales (cône, cellules bipolaires, cellules ganglionnaires). Par ailleurs des connexions horizontales, assurées par les cellules horizontales d'une part, amacrines d'autre part, définissent des champs spécialisés de détection différentielle pouvant assurer le codage de caractéristiques particulières de l'image: variation d'intensité, couleurs, frontière colorée, sens de déplacement, etc. (Figure I.3).

Ce codage, réalisé avant l'entrée du nerf optique, permet une compression de l'information d'un facteur voisin de cent, en même temps que sa digitalisation. L'analyse de ces structures d'image par le cerveau conduira à la perception de l'environnement visuel.

La vision centrale précise et la perception colorée ne concerneraient donc, si l'oeil était statique, qu'un champ très réduit, de l'ordre de 1 à 2 degrés. La saisie des informations dans notre environnement n'est donc possible que par un balayage de l'ensemble de la tâche visuelle (balayages, saccades, fixations). C'est également à travers les balayages visuels que seront obtenues la reconnaissance et l'appropriation de l'espace environnant stocké sous forme d'image fictive dans le cerveau. Il sera donc important de ne pas perturber ces balayages visuels, par exemple par des reflets (qui provoquent des "arrêts sur image").

Lorsque l'on s'éloigne de la zone centrale les bâtonnets assurent presque seuls la détection des signaux lumineux. La sensibilité est encore augmentée vers la périphérie où les bâtonnets sont connectés par paquet (jusqu'à 10000) au nerf optique, augmentant ainsi la probabilité de détection d'un signal. Ces détecteurs restent donc actifs à des niveaux très bas (de l'ordre de 10^{-6} Cd/m^2) mais ne permettent qu'une vision imprécise et non pourvue de coloration.

En utilisant les bâtonnets puis les cônes, le système visuel est capable de détecter de très faibles signaux lumineux ou de supporter des éclaircissements très

importants (dynamique de l'ordre de 10^9), mais il ne peut le faire que par plages successives de niveaux lumineux en adaptant l'état physico-chimique des récepteurs rétiniens. Cette adaptation est rapide pour des augmentations de luminance, plus lente ou très lente lorsque le niveau lumineux diminue (phénomène du "trou noir" en conduite de nuit). La raison en est que les molécules responsables de la vision sont instables, et il suffit qu'un photon de longueur d'onde appropriée apporte une petite énergie d'activation pour qu'elles se scindent en deux et fournissent un stimuli. Cette réaction de dissociation est heureusement réversible, mais la recombinaison se fait en respectant approximativement une équation différentielle du premier ordre dont la constante de temps est de l'ordre de la dizaine de minutes pour les bâtonnets. Il faut donc plus de 30 minutes pour que l'oeil soit totalement adapté à l'obscurité. La constante de temps de reconstitution des cônes est moins longue, mais elle n'est pas sans conséquence sur la vision des couleurs.

I.4 - Vision des détails, vision des couleurs

I.4.1 - Vision des détails :

La perception d'un détail sur un fond n'est possible que si celui-ci présente une luminance ou une couleur (ou les deux) différente du fond. On dit que le détail forme un contraste avec le fond. Il s'agit d'un contraste de luminance si seules interviennent les luminances (photo en noir et blanc, fond et détail de même couleur), on parlera de contraste de couleur si le détail présente une couleur différente du fond tout en ayant la même luminance que lui. D'autres facteurs tels que la dimension, l'environnement lumineux vont également intervenir dans cette perception. Une description assez fine des propriétés achromatiques du système visuel est donnée par la figure I.4. Cette figure donne, en fonction de la fréquence spatiale (liée à la dimension angulaire du détail), la modulation de contraste la plus faible qui puisse être perçue pour une adaptation lumineuse donnée.

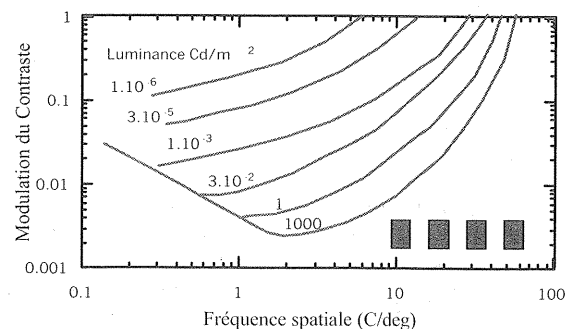


Figure I.4: Modulation du contraste $\Delta C/C$ en fonction de la fréquence spatiale en cycles par degré d'angle pour différentes luminances de fond. La fréquence fondamentale de la mire (en bas à droite) est de 1,82 cycles/cm ou 1,27 cycles/deg vue à 40cm.

Le large domaine de fréquences spatiales couvert ne l'est cependant que par juxtaposition de canaux de fréquences plus étroits. La figure 1.5 montre que des informations différentes ne doivent pas circuler dans un même canal sous peine de confusion.

1.4.2 - Vision des couleurs :

La sensation colorée résulte de l'excitation différenciée des trois types de cônes rétinien. Comme le montre la figure 1.3.a, les courbes de sensibilité de ces trois familles de cônes sont très larges avec des maxima situés respectivement à 425nm pour les cônes bleu (cyanolabe ou S), 535nm pour les cônes vert (chlorolabe ou M) et 565nm pour les cônes rouge (érythrolabe ou L). Les cônes L et M sont en nombres voisins par contre les cônes S sont environ 5 fois moins nombreux. Seules vont intervenir dans la sensation colorée les amplitudes des réponses des cônes L, M ou S, quelle que soit la nature de l'excitation qui les provoquent. Il en résulte que deux compositions spectrales différentes pourront donner la même impression colorée si les excitations résultantes sont les mêmes, c'est le phénomène de métamérisme.

Le cycle de décomposition – reconstitution subi par les molécules de la vision a pour conséquence qu'une lumière colorée modifie la sensibilité de l'oeil aux différentes longueurs d'onde. Par exemple l'éclairage à incandescence émet une lumière pauvre en bleu (figure 5). Lorsque l'on passe brutalement d'un éclairage de type lumière du jour à un éclairage à incandescence, il se produit un régime transitoire au début duquel les cônes de types M et L sont beaucoup plus sollicités que les cônes S. L'éclairage est alors perçu comme une source colorée à dominante jaune. Au cours des minutes qui suivent, le nombre de cônes non dissociés augmente pour le type S et diminue pour les types L et M. La modification de la réponse de l'oeil a pour effet de compenser partiellement la coloration de la lumière ambiante. Tous les photographes amateurs ont été confrontés au problème suivant : sur les photographies prises sans flash dans une lumière artificielle, le mur blanc d'une pièce a une teinte jaune, alors qu'au moment de la prise de vue il semblait presque blanc. La cause en est que, contrairement à la pellicule photographique, la réponse de l'oeil du photographe s'adapte à la coloration de la lumière ambiante.

La détection des frontières de couleurs et des contrastes colorés résulte de la réponse des champs chromatiques spécialisés définis par les interconnexions horizontales rétinien qui concernent un grand nombre des cellules détectrices de la fovéa.

1.4.3 - Temps, espace, intégration :

La dépendance vis à vis du temps comme celle vis à vis de l'espace ne présentent pas les mêmes propriétés selon qu'il s'agit d'informations intensives ou d'informations chromatiques (figure 1.6). Par ailleurs,

l'évaluation de l'apparence lumineuse d'un stimulus dépend des conditions de présentation. Si le stimulus est un éclair bref ou à cadence rapide ($>10\text{Hz}$) ou bien s'il est ponctuel ou structuré en maillage fin ($>10\text{cpd}$), l'apparence lumineuse correspond à la luminance.

Mais si le stimulus est présenté en permanence et en grande dimension ($>2^\circ$), une réponse d'origine chromatique ajoute sa contribution à l'apparence lumineuse, si bien que des stimulus colorés de même luminance que le blanc paraissent plus lumineux que ce dernier, leur *luminosité* est plus grande.

Cependant, la détection d'un détail ne constitue que la première phase de la saisie de l'information, il faut encore que le détail soit reconnu et identifié ce qui met en jeu d'autres paramètres: forme, netteté, position dans le champ visuel, interprétation du symbole...

Au total, il semble établi que le traitement de l'image se fait à plusieurs niveaux et à travers des intégrations de plus en plus complexes de caractéristiques d'image. A un niveau élevé d'intégration certains auteurs considèrent que la perception s'effectue essentiellement à travers trois systèmes de transmission et d'interprétation :

- un premier système traite une information à haute résolution résultant des contours que définissent les contrastes colorés. C'est un système lent qui semble adapté à l'examen de détails d'objets stationnaires.

- un autre système traite l'information concernant les couleurs et les niveaux de gris mais pas le mouvement, les formes ou la profondeur. Il permet la détection des couleurs mais non des détails fins.

- enfin un système transmet l'information sur le mouvement et la profondeur stéréoscopique. Ce système, qui a un temps de réponse très court, voit sa réponse décroître rapidement lorsque l'information est maintenue. Il est donc efficace pour la détection du mouvement mais inadapté à l'examen détaillé d'images fixes. Il est également insensible aux couleurs.

Ce traitement très complexe fait qu'il est pour le moment impossible de numériser globalement la perception de notre espace visuel. Des approches adaptées à différents aspects particuliers sont nécessaires. Bien que moins riches, elles permettent plus facilement de caractériser et de chiffrer une situation vis à vis d'une fonction visuelle donnée.

II - MESURER LA LUMIERE, REPERER LA COULEUR

II.1 - Mesurer la lumière

Les grandeurs de la photométrie visuelle physique se déduisent des unités de la photométrie physique en faisant intervenir une fonction de pondération $V(\lambda)$ qui rend compte de la sensibilité moyenne relative de l'oeil humain aux différentes

radiations du spectre visible lorsque l'œil travaille en vision photopique (vision par les cônes). En effet 1 Watt de radiation ne produira pas le même effet de luminosité selon que ce Watt de radiation sera émis par exemple dans le bleu (450 nm), le vert (535 nm) ou le rouge (680 nm), les luminosités seront respectivement proportionnelles à 0,038 pour le bleu, 0,914 pour le vert et 0,017 pour le rouge, enfin $V(\lambda)$ vaut 1 pour une lumière de longueur d'onde 555 nm. L'allure de la fonction $V(\lambda)$ est donnée dans la figure II.1. Par définition, 1 Watt d'une lumière de longueur d'onde 555 nm correspond à 683 lm.

Ainsi si le flux énergétique spectrique $\varphi(\lambda)$ est en Watt par unité de longueur d'onde (ou Wm^{-1}), le flux lumineux qui lui correspond s'écrit :

$$F = k_m \int_{380}^{720} \varphi(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Si le flux lumineux est exprimé en lumen, k_m vaut 683 lm/W. Avec cette unité le flux lumineux d'une lampe à incandescence de 100 W est de 1380 lumen (1380 lm), celui d'un tube fluorescent de 36W-IRC 85 de 3300 lm.

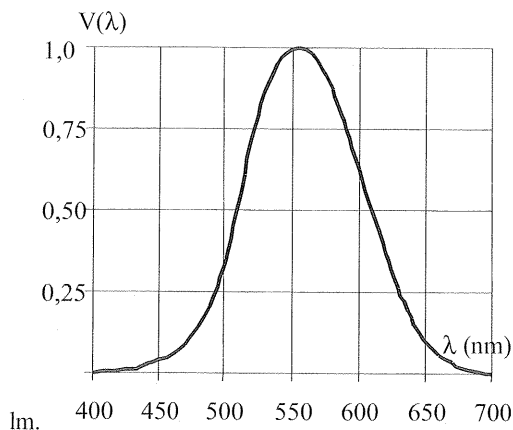


Figure II.1: Sensibilité moyenne relative de l'œil

Une autre grandeur intéressante, car elle caractérise la façon dont le flux lumineux est envoyé dans l'espace, est l'intensité lumineuse (Figure II.2). Elle mesure, pour une direction donnée, la densité de flux par unité d'angle solide et s'exprime donc en lumen par stéradian ou candela (cd). Rappelons qu'un angle solide de 1 stéradian intercepte sur la sphère de rayon R centrée au point d'émission une surface d'aire R^2 .

L'œil est sensible à la luminance qui correspond à la densité de flux par unité d'angle solide et par unité de surface de source vue dans la direction d'observation.

Cette grandeur s'exprime donc en lumen par stéradian, par unité de surface vue (surface droite) c'est à dire en candela par m^2 (cd/m^2). La grandeur la plus

connue est cependant l'éclairement qui rend compte du flux lumineux tombant sur l'unité de surface, il s'exprime en lumen par m^2 ou lux.

Considérons pour illustrer ces grandeurs la figure II.3 qui montre Photonix éclairé soit par une lampe de 100 W claire (a), soit par une lampe 100 W en verre dépoli (b). Ces lampes délivrent l'une et l'autre un flux de 1380lm, ce qui leur donne, notons-le au passage, une efficacité lumineuse de 13,8 lm/W. Les intensités dans les deux directions considérées sont sensiblement les mêmes et identiques pour les deux lampes, on a $I_1 \approx I_2 \approx 109$ Cd. Les éclairagements procurés sur les luxmètres, à 1m sous les lampes, sont également sensiblement les mêmes et sont voisins de 109 lux. Les luminances très élevées des deux lampes sont par contre très différentes, dans le cas (b) la luminance n'est que de 35.000 Cd/m^2 environ alors que dans le cas (a) elle dépasse le million de Cd/m^2 . Cette différence de luminance provient des surfaces apparentes très différentes des surfaces qui émettent la lumière, l'ampoule dans le cas (b), le filament dans le cas (a).

La luminance de la chemise est beaucoup plus basse, sans aucun doute, voisine de 15 à 20 Cd/m^2 .

II.2 - Repérer la couleur

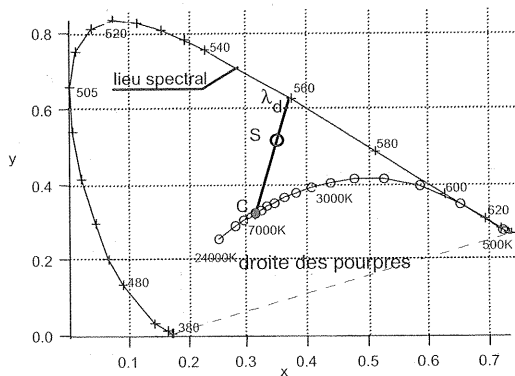
On a cherché depuis longtemps à repérer les couleurs pour pouvoir les reproduire. Ce repérage s'est d'abord fait par comparaison avec des échantillons classés selon une logique chromatique. Dans ce domaine, la classification systématique la plus ancienne est sans doute celle de Chevreul (1838). Actuellement une des plus utilisée est celle de Münsell (1929). Trois paramètres ont été retenus par Münsell, la clarté qui correspond à une échelle allant du noir au blanc, la teinte (pourpre, violet, bleu, vert, rouge...), la saturation qui rend compte du fait que la teinte est plus ou moins pure.

Ces couleurs sont des couleurs de surfaces par opposition aux couleurs dites d'orifices qui sont des lumières pures. Dans la perception des couleurs de surfaces la nature de la surface, son pouvoir spéculaire ou diffusant interviennent, ainsi une couleur pastel mate correspond à une couleur désaturée et diffusante.

Ces couleurs de surfaces correspondent à des mélanges soustractifs dans la mesure où la surface ne réfléchit (ou ne transmet) qu'une fraction de la lumière incidente puisqu'elle soustrait la partie absorbée.

La reproduction et la maintenance des couleurs de surface de référence sont délicates et une autre voie a été suivie pour construire la colorimétrie, celle de la recombinaison des couleurs à partir de trois composantes, ou bases, définies en couleur et en intensité. On utilise généralement comme bases expérimentales des lumières repérées en longueurs d'ondes et en luminances (ou en flux). Les quantités S_B , S_G , S_R de ces lumières de base, nécessaires pour

reproduire un stimulus S_0 prennent le nom de composantes trichromatiques, les grandeurs réduites $s_i = S_i / (S_B + S_G + S_R)$ qui s'en déduisent (avec $I = R, G, B$) sont appelées coordonnées trichromatiques. On peut passer du système expérimental R, G, B à d'autres systèmes par des transformations généralement linéaires. Le plus connu de ces systèmes est sans doute le système X, Y, Z (CIE 1931). Il est dès lors possible de repérer la chromaticité d'une couleur par ses coordonnées x, y par exemple. En particulier on a l'habitude de représenter dans le diagramme des couleurs les chromaticités des diverses radiations spectrales ainsi que celles du corps noir à différentes températures (Figure II.5). La droite qui joint les extrémités violette et rouge du spectre prend le nom de droite des pourpres. Les blancs sont dans la région centrale du diagramme, les couleurs complémentaires (par rapport à un certain blanc, ici C) sont les intersections des droites passant par C avec le lieu spectral par exemple "jaune" (580 nm) et "bleu" (480 nm) ou vert et pourpre.



Un autre moyen de repérage consiste à repérer un stimulus, S par exemple, par rapport à un blanc de référence (ici l'étalon C). On trace la droite CS qui coupe le lieu spectral en λ_d . On donne à λ_d le nom de longueur d'onde dominante, au rapport CS/C le nom de pureté d'excitation.

II.3 - Mélanges de couleurs, illusions optiques

II.3.1 - Mélanges de lumières ou mélanges de pigments :

Considérons trois pinceaux lumineux, bleu violet (B), vert (V) et Rouge (R). Leur mélange en proportion convenable va donner le résultat de la figure II.6.a qui correspond à une synthèse additive. Dans ce cas les mélanges sont plus lumineux que les faisceaux mélangés. Si au contraire on éclaire en lumière blanche trois filtres, jaune (J), magenta (M) et cyan (C), on obtient le résultat de la figure II.6.b qui correspond à une synthèse soustractive. Dans ce cas les lumières issues des différents filtres sont de moins en moins lumineuses.

Le mélange soustractif est également réalisé

lorsqu'on éclaire en lumière blanche un mélange de pigments colorés. Ainsi si l'on éclaire en lumière blanche un mélange de pigments jaune et bleu on obtient un faisceau émergent vert. En effet, le pigment jaune absorbe la fraction bleue de la lumière blanche, le pigment bleu absorbe la fraction rouge de la lumière blanche alors que la fraction verte du blanc est un peu réfléchi par les deux pigments. Si maintenant on éclaire le mélange avec de la lumière magenta qui ne contient pas de vert, il n'y aura pas de faisceau émergent, on obtient du noir. La nature de la lumière éclairante conditionne donc fortement l'aspect coloré des objets.

II.3.2 - Illusions optiques :

Nous avons vu que les interconnexions rétiniennes définissent des champs analyseurs capables d'extraire des structures d'image. Quelquefois ces analyseurs sont en conflit, il en résulte des "hésitations" du système de traitement ou illusions optiques.

Ainsi dans la figure II.7.a le noir dans le jaune paraît plus noir que le noir dans le bleu. En II.7.b les deux carrés gris sont identiques de même que les deux barres grises. Enfin, en II.7.c, on croit percevoir des zones grises entre les coins des carrés.

III - CREER LA LUMIERE

III.1 - Lumière naturelle, lumière artificielle

C'est la lumière naturelle qui a permis l'apparition puis le développement de notre système visuel, par la suite la maîtrise du feu a permis de sécuriser la phase de vie nocturne tout en autorisant des activités nouvelles. Ces deux lumières anciennes, forte luminosité (1000 à 100000 lux) et température de couleur élevée ($T_{CP} \approx 5400$ à 8000 K) pour la lumière naturelle, faible luminosité (10 à 100 lux) et basse température de couleur ($T_{CP} \approx 1000$ à 2000 K) pour le feu, restent des références importantes dans notre appréciation de la qualité d'une ambiance lumineuse. Au moins jusqu'à la fin du 19ème siècle, la flamme (chandelle, bougie, lampes à pétrole ou à gaz...) resta d'ailleurs pratiquement la seule source de lumière artificielle utilisée par la population. C'est en effet seulement en 1879 qu'Edison proposa une lampe à incandescence pratiquement utilisable comportant un filament de carbone fonctionnant dans le vide. Cette lampe, dont l'efficacité lumineuse était de 2 à 3 lm/W pour une durée de vie de 600 à 800 h, donnait une lumière assez rougeâtre.

Coolidge lança en 1911 la lampe à incandescence à filament de tungstène qui, améliorée en 1918 (utilisation de l'argon) puis 1936 (double puis triple spirale du filament), conduisit aux lampes à incandescence actuelles. Ces lampes présentent une efficacité lumineuse de l'ordre de 12 à 14 lm/W pour une durée de vie de 1000h et une température de couleur de 2700 à 2800K. Dans les années 1960 un

nouveau pas fut franchi avec la mise au point des premières lampes à incandescence à halogène (efficacité 16 à 22 lm/W, durée de vie 2000h, température de couleur \approx 3000K).

Les premiers essais de lampes à décharge datent des expériences de Davy (1813) alors que la première réalisation d'éclairage public basé sur la décharge est sans doute due à Léon Foucault (éclairage de la place de la Concorde en 1844). Il faut en réalité attendre les années précédant la guerre 39-45 pour voir apparaître les premières lampes mercure haute pression vraiment efficaces en même temps qu'étaient utilisées en public les premières lampes fluorescentes. Le développement de l'utilisation des lampes à décharge dans pratiquement tous les domaines de l'éclairage date des années 60 qui virent l'apparition des lampes sodium haute pression puis des lampes à halogénures métalliques.

III.2 - Sources thermiques et sources à décharge (luminescentes)

Toutes les sources que nous venons de citer peuvent se rattacher à l'une ou l'autre de ces deux familles. Il est intéressant de se référer au rayonnement du corps noir pour comprendre les limitations des sources thermiques, flamme ou incandescence métallique. La figure III.1 donne les luminances spectrales (densité de luminance par unité de longueur d'onde) relatives du corps noir à 2700 et 5200K.

$$L_{(\lambda,r)} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda \cdot kT}\right) - 1}$$

$$\lambda_{\max} (m) = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T(K)} \text{ la constante est en m}^{\circ}\text{K}$$

$$M = \delta L_{CN} = \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} T^4 \text{ (W m}^{-2}\text{)}$$

On a reporté sur la même figure III.1 l'émission de raie (simplifiée) d'une décharge haute pression à halogénures métalliques ainsi que la courbe $V(\lambda)$ de sensibilité moyenne relative de l'œil humain. On vérifie tout d'abord qu'à 5200K le corps noir émet beaucoup plus qu'à 2700K, on constate ensuite qu'à cette dernière température son maximum d'émission se situe dans l'infrarouge et non plus dans le visible comme à 5200K.

Les principales conséquences pratiques que l'on peut tirer de ces résultats sont les suivantes:

(a) - pour rayonner dans le visible un métal (généralement proche d'un corps gris dans le visible) devrait être porté à une température trop élevée pour qu'il reste solide, pour le tungstène on ne dépasse pas 3200K. Le maximum d'émission d'une lampe à incandescence est donc toujours situé dans le proche infrarouge et non dans le visible, il en résulte une forte

limitation de l'efficacité lumineuse (environ 20 lm/W pour les lampes à halogène d'éclairage général).

(b) - pour obtenir une meilleure efficacité des lampes à incandescence il faudrait limiter l'émission dans l'infrarouge. On ne sait pas réaliser cette condition à haute température, par contre on sait réfléchir une partie du rayonnement infrarouge vers le filament ce qui pourrait amener l'efficacité à 30 lm/W, peut être plus.

(c) - dans une décharge à haute pression thermalisée (quelques bars, température au centre \approx 5000K), le rayonnement dans certaines parties du spectre peut approcher l'émission du corps noir. Il en résulte que les lampes haute pression pourront produire une forte densité de rayonnement (10^3 à 10^4 lm/cm³) avec une bonne efficacité (50 à 110 lm/W).

Ces quelques remarques peuvent servir de guide pour les sources à incandescence ou pour les lampes à décharge haute pression. Il reste à examiner une dernière catégorie très importante de lampes à décharge, les lampes à décharge à basse pression (quelques millibars).

L'intérêt principal d'une décharge basse pression est que l'on peut, dans une certaine mesure, contrôler son rayonnement. Ceci permet d'obtenir des efficacités importantes (50 à 200 lm/W). Par contre, la basse pression implique une faible densité de matière et donc une beaucoup plus faible densité de rayonnement (1 à 10 lm/cm³) que pour les lampes haute pression.

Une autre propriété importante des lampes réside dans le rendu des couleurs qu'elles permettent. Disons simplement que pour permettre une bonne perception des couleurs une lampe doit présenter un spectre suffisamment riche dans les différentes régions du spectre. A l'heure actuelle, les lampes qui permettent les meilleurs rendus de couleurs appartiennent aux familles des lampes fluorescentes (gammas chromatiques) et des lampes à halogénures métalliques (lampes à indice de rendu de couleur >90 et $T_c \geq 5000K$).

IV - ORGANISER LA LUMIERE

Dans le champ des luminances, principale grandeur photométrique à laquelle l'œil soit sensible, on peut généralement distinguer deux types de zones (Figure IV.1) : l'ergo rama (ou les ergorama) qui correspond à la partie d'espace où s'effectue la tâche visuelle (lecture, recherche de défauts, etc), le panorama qui est la zone de l'espace où le système visuel vient se détendre musculairement et en terme de charge mentale.

On considère que, pour l'ensemble de l'espace visuel, un rapport 100 ne devrait jamais être dépassé entre les luminances les plus faibles et les luminances les plus fortes des surfaces matérielles. Dans

l'ergorama il est souhaitable de ne pas dépasser une valeur comprise entre 10 et 15.

Entre ces deux types de zones, des liaisons devront exister, qui soient compatibles avec l'activité du système visuel dans chacune d'elles. Les compatibilités concernent aussi bien les rapports de luminances que les couleurs ou l'organisation de l'espace.

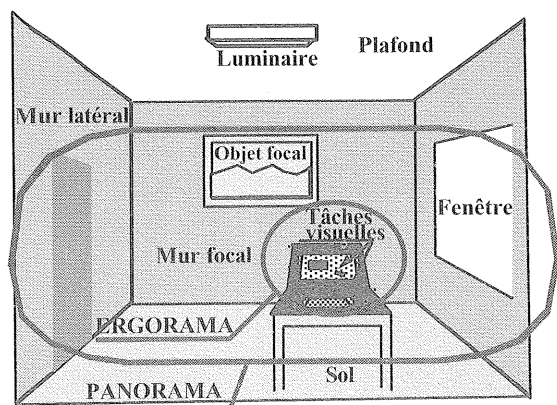


Figure IV.1 : Les triades Ergorama, Panorama, Liaisons et Source, Objet, Système visuel

Les liaisons souhaitables dépendent évidemment de l'activité exercée par l'individu et de la "pression extérieure" (ou niveau de demande) sous laquelle elle s'exerce (rythme, risque pour l'individu ou pour l'entreprise, etc).

La construction de l'ambiance visuelle devra donc prendre en compte les contraintes attachées à ces différents éléments, nécessité d'assurer la performance visuelle dans l'ergorama (ou les ergorama), prise en compte des équilibres de luminances entre ergorama et panorama comme entre éléments du panorama, choix d'une organisation de l'espace et d'une décoration compatibles avec l'activité exercée dans le local et dans l'entreprise.

Pour en savoir plus.

P BUSER ; M. IMBERT : *Vision*. HERMANN, 1987

CORBE C., MENU J.P., CHAINE G.
Traité d'optique physiologique et clinique
DOIN, 1993

P KOWALISKI : *Vision et mesure de la couleur*
MASSON, 1990

F VIENOT : *Perception de la couleur*, dans *Vision, aspect perceptif et cognitif*, collectif sous la direction de M BOUCART, M-A HENAFF et C BELIN
SOLAL 1999

Y GALIFRET : *Vision*, Encyclopédie Universalis

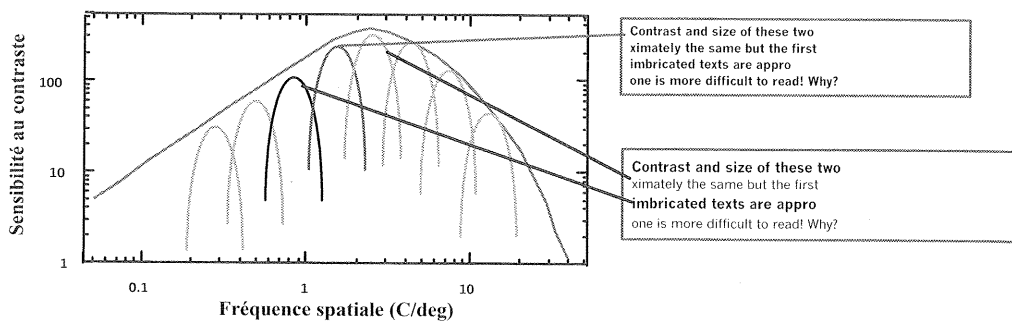
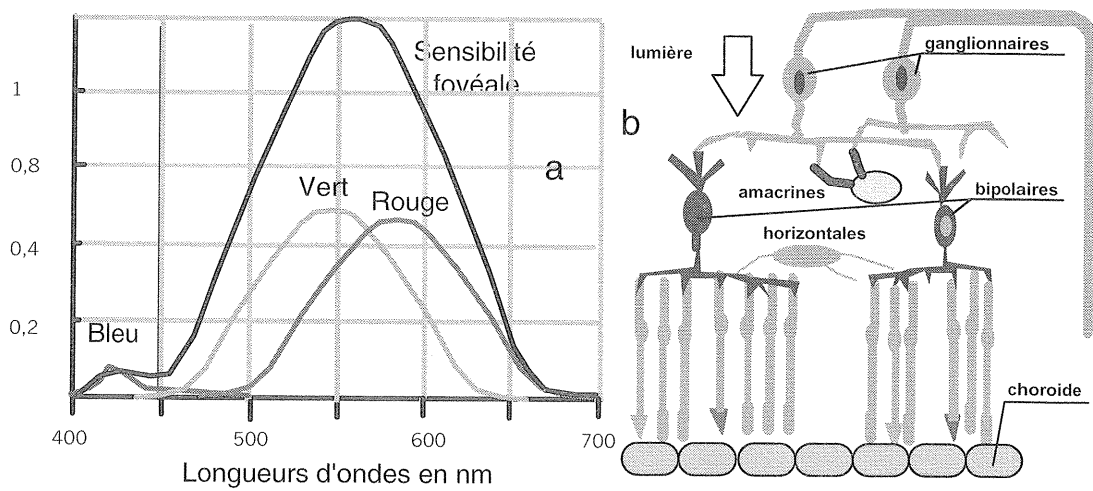
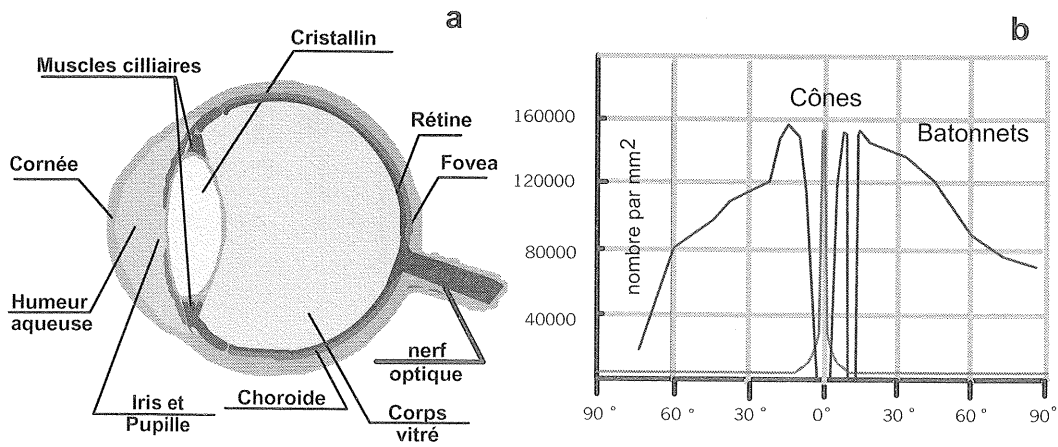


Figure I.5: Cheminement des messages visuels

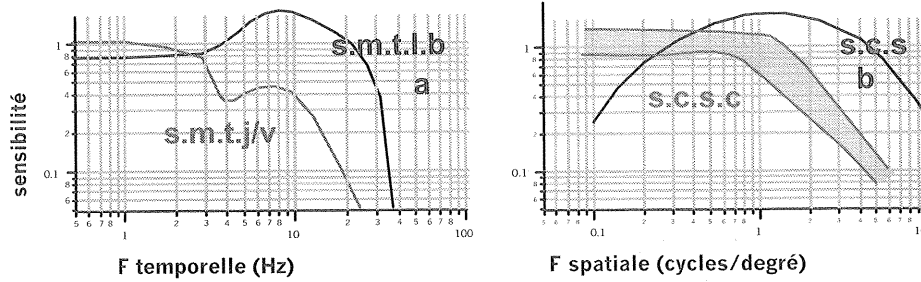


Figure I.6: Influence des fréquences temporelle (a) et spatiale (b) sur les sensibilités intensive et chromatique. (smtlb: sensibilité à la modulation temporelle au contraste de luminance - smtj/v: sensibilité à la modulation temporelle jaune/vert - scs: sensibilité au contraste de luminance - scsc: sensibilité au contraste coloré)

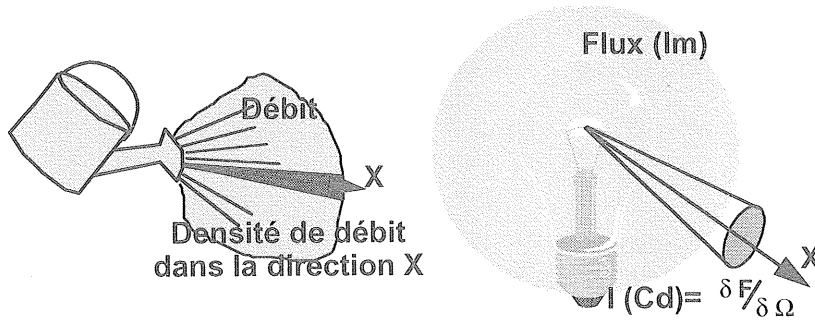


Figure II.2: Flux et intensité lumineuses, analogie hydraulique

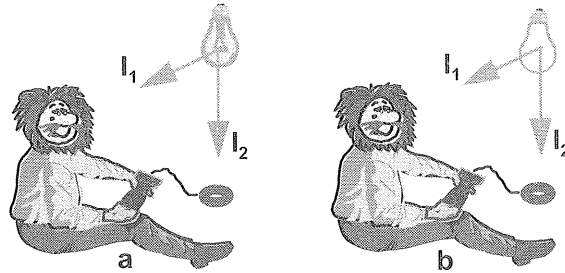


Figure II.3 : Photonix mesure la lumière

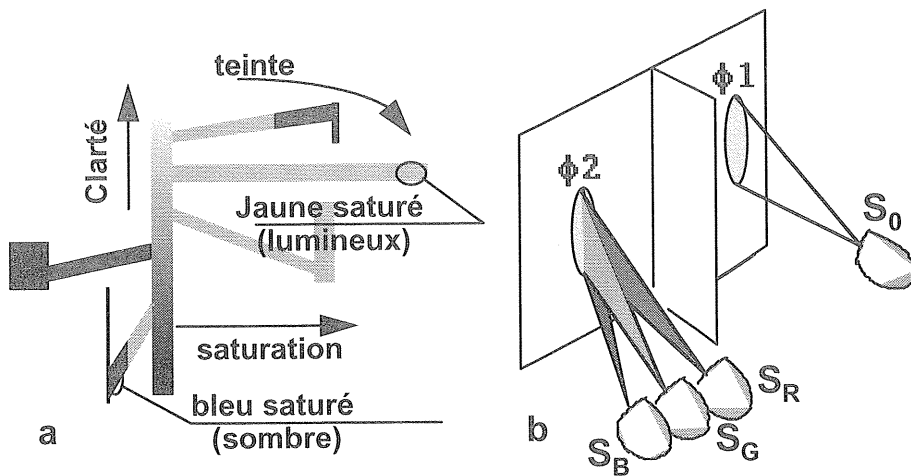


Figure II.4: Deux façons de repérer la couleur, par classification/comparaison (a), par reconstitution (b)

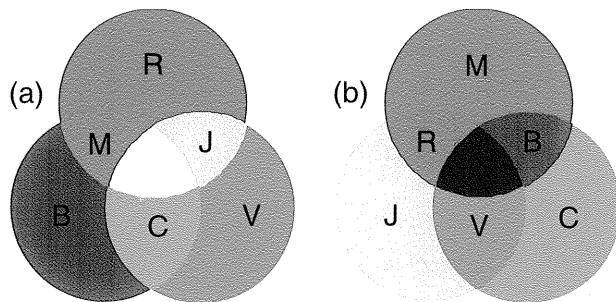


Figure II.6: Mélanges additifs (a) et soustractif (b)

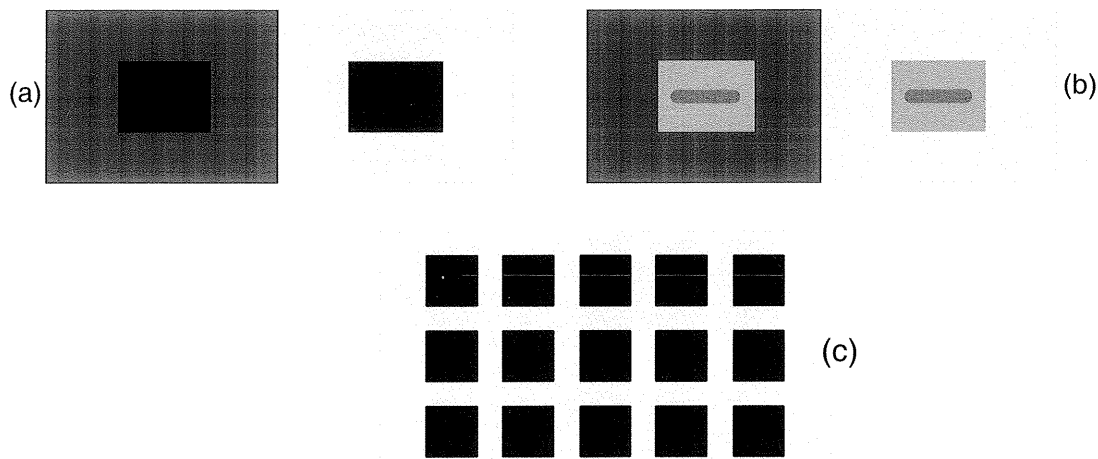


Figure II.7: Exemples d'illusions

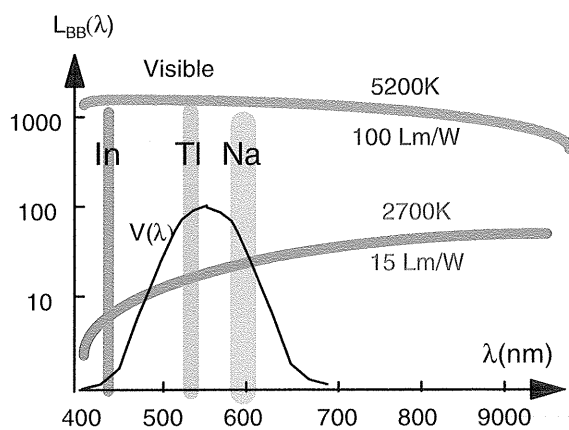
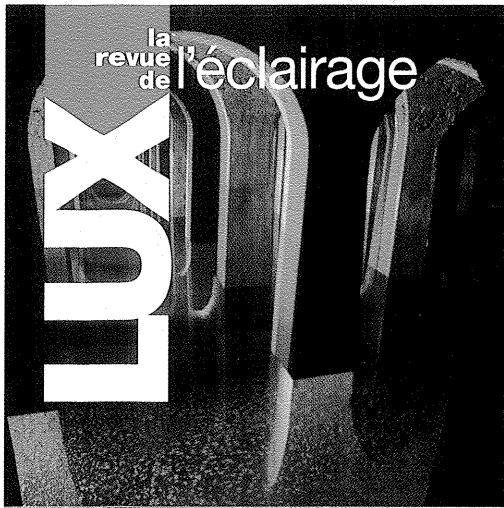
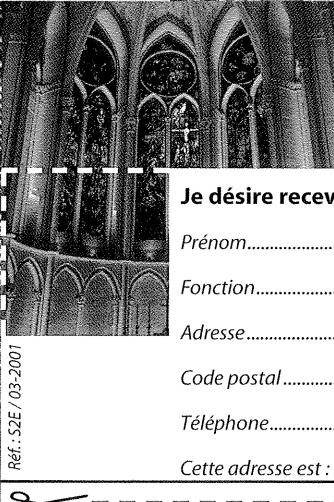


Figure III.1: Emission du corps noir à 2700K et 5200K, émission de raie d'une décharge tri-iodures, sensibilité relative de l'oeil



Partenaire incontournable de la filière Éclairage, LUX vous fait découvrir les différentes applications de la lumière en éclairage intérieur, extérieur, fonctionnel, décoratif et architectural, à travers les nouveautés des lampes, des luminaires, des composants et des systèmes.

Pour recevoir un spécimen de la revue LUX, remplissez le coupon-réponse et retournez-le à :
LUX • 17 bis, rue Joseph de Maistre, 75881 Paris Cedex 18
Tél.: 01 44 92 50 50 - Fax : 01 44 92 50 51



Réf.: S2E / 03-2001

Je désire recevoir un spécimen de la revue LUX. Je complète ce coupon :

Prénom..... Nom.....
 Fonction..... Société.....
 Adresse.....
 Code postal..... Ville.....
 Téléphone..... Fax..... E-mail.....
 Cette adresse est : professionnelle privée



3EI
Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

c'est



- Une revue trimestrielle
- Un site web pour partager l'Enseignement du Génie Electrotechnique : <http://www.lesite3EI.com>

Thèmes prévus pour l'année 2001 - 2002

- ☞ L'éclairage - n° 24 (mars 2001)
 - ☞ L'état de l'art en électronique de puissance - n° 25 (juin 2001)
 - ☞ Pratiques pédagogiques et réalités industrielles n° 26 (septembre 2001)
 - ☞ Métrologie : Mesure et estimation - n° 27 (décembre 2001)
 - ☞ Convertisseurs propres - n° 28 (mars 2002)
 - ☞ Convertisseurs embarqués - n° 29 (juin 2002)