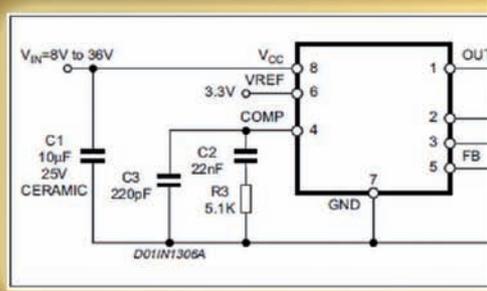
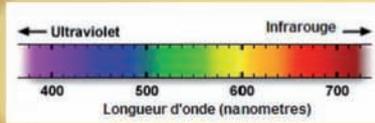
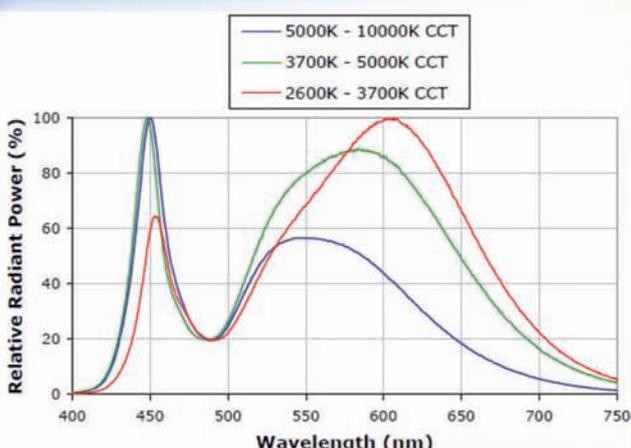
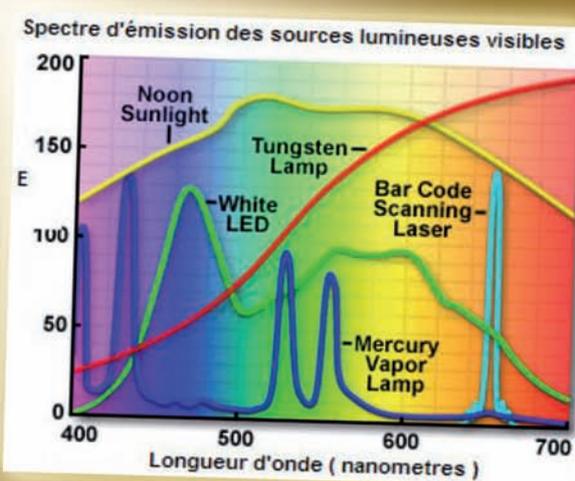
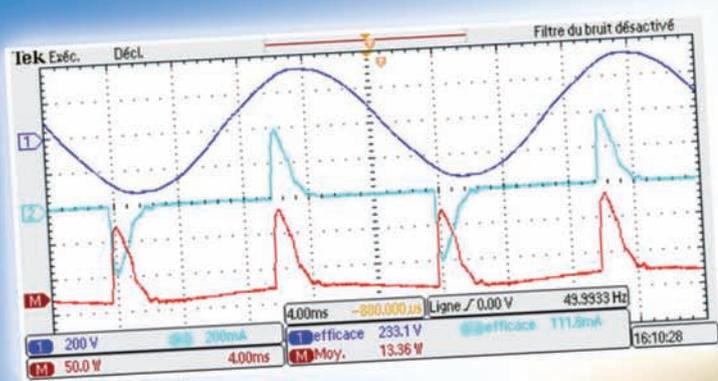


La Revue SEE



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



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° 67 - Janvier 2012

BÂTIMENT-ÉNERGIE

Quelles contributions du génie électrique ?

JOURNÉES DU CLUB EEA



15-16 MARS 2012

Site universitaire de Gennevilliers

Z.A.C des Barbanniers

Avenue Marcel Paul - 92230 Gennevilliers

Accès au site de Gennevilliers

Train RER C : arrêt Gennevilliers

Metro ligne 13 : arrêt Asnières-Gennevilliers/Les Courtilles

Bus : 138/166/240/340/378 : arrêt au rond-point Pierre TIMBAUD



SATiE



La Revue 3EI
publication trimestrielle
du **Cercle Thématique 13-01**
de la **SEE**

**SOCIÉTÉ de l'ÉLECTRICITÉ, de l'ÉLECTRONIQUE
et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION
et de la COMMUNICATION.**

17, rue de l'Amiral Hamelin, PARIS 75783 CEDEX 16
Tél : 01 56 90 37 00 Fax : 01 56 90 37 19
site web : www.see.asso.fr

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886
Siret 785 393 232 00042, APE 9412 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

3EI : Enseigner l'Électrotechnique et l'Électronique Industrielle

<p>La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 PARIS Cedex 16</p> <p>Directeur de la publication Paul FRIEDEL Président de la SEE</p> <p>Rédactrice en Chef Marie Michèle LE BIHAN</p> <p>Adresser les propositions d'article à : revue3ei.art@voila.fr</p> <p>Communication Micheline BERTAUX communication@see.asso.fr 01 56 90 37 17</p> <p>publicité au rapport</p> <p>Abonnement (4 numéros par an) Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2012.</p> <p>tarifs TTC :</p> <p>Individuel : France et CEE.....38 € Pays hors CEE.....48 €</p> <p>Collectivités France et CEE.....54 € Pays hors CEE.....67 €</p> <p>Réalisation et impression Repro-Systèmes 23, rue de Verdun 77181 Le Pin</p> <p>Routage et Expédition Départ Presse ZI les Richardets 93966 Noisy le Grand</p> <p>Dépôt Légal : Janvier 2012</p> <p>Commission Paritaire 1212 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n° 67</p> <p style="text-align: right;">Thème : L'éclairage</p> <p>p. 2 Éditorial,</p> <p>p. 3 Publications, Informations,</p> <p>p. 6 Les nouvelles technologies de l'éclairage – vers la lumière « électronique » G.ZISSIS, D. BUSO, M. TERNISIEN Université de TOULOUSE</p> <p>p. 13 . Etude comparative de trois technologies de lampes d'éclairage J-F. SERGENT Université LILLE</p> <p>p. 21 . Ballast électronique pour éclairage par tube fluorescent Equipe pédagogique, département EEA, ENS CACHAN</p> <p style="text-align: right;">Hors Thème</p> <p>p. 23 Organisation de chantier : Equipement en réseau des salles BTS Electrotechnique E. BRUNEAU Lycée Gaston BACHELARD CHELLES</p> <p>p. 35 Rénovation d'une installation de pompage pour distribution d'eau potable D. BRUNET, D. WOZNIAK Lycée La Fayette - CHAMPAGNE SUR SEINE</p> <p>p. 42 Le SMES comme source d'alimentation impulsionnelle pour le lanceur à rails P. TIXADOR, P. LEHMANN, A. BADEL, M. AMIET</p> <p style="text-align: right;">Histoire des sciences</p> <p>p. 49 L'épopée hydroélectrique d'après guerre : vision d'un ingénieur D. DAVID Directeur de Recherche au CNRS VERNON</p> <p style="text-align: right;">Pédagogie</p> <p>p. 58 Un exercice sur les volants d'inertie N. MAGDELAINE NANTES</p> <p>p. 61 Simulation et mise en œuvre pratique d'un convertisseur AC-DC monophasé à prélèvement sinusoïdal M. PETIT, E. RULLIERE, M. BRUNELLO ENSE SAINT MARTIN D'HERES</p> <p>p. 69 Impact du Véhicule Electrique sur le Réseau de Distribution National Compte-rendu de la soirée-débat organisée par la SEE</p> <p style="text-align: right;">Et Demain ?</p> <p>p. 71 Et demain ? Tour d'horizon des avancées technologiques</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'oeuvre 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).

Nous inaugurons cette année une parution échelonnée sur l'année civile, les quatre numéros de notre revue paraissant aux mois de Janvier, Avril Juillet et Octobre. Nous espérons que cela rendra plus repérable la période de réabonnement évitant ainsi les envois coûteux des revues (après routage) aux abonnés tardifs.

Les articles du thème « **l'Eclairage** » de ce mois de Janvier viennent compléter les études déjà parues dans des numéros précédents et nous font apprécier combien les technologies ont évolué et peuvent encore évoluer. Deux articles se veulent résolument pédagogiques et présentent des travaux pratiques proposés sur ce thème.

Dans la partie hors thème, nous publions des articles que les contraintes de l'édition ne nous avaient pas permis de publier dans les derniers numéros. Il s'agit de deux articles écrits par des collègues de **l'Académie de Créteil**

-« L'organisation de chantier et l'équipement en réseau des salles de BTS Electrotechnique »

-« La rénovation d'une installation de pompage pour distribution d'eau potable »

Et d'un article de la rubrique « **Concordat Génélec** »

- « Le SMES comme source d'alimentation impulsionsnelle pour le lanceur à rails »

Merci aux auteurs pour leur patience.

Nous renouons avec la rubrique **Histoire des Sciences et Techniques** devrions nous dire, avec un récit sur l'épopée hydraulique d'après guerre à travers un roman. Merci à Mr David pour cette approche originale.

La rubrique « **Et demain... ?** » petite dernière de nos idées, vous donnera des nouvelles de notre stratosphère 3EI.... Vous pouvez d'ailleurs nous glisser vos idées.

Les thèmes prévisionnels des prochains numéros sont :

- **Défaillance et durée de vie du matériel électrique** en Avril 2012
- **Bâtiment du futur** en Juillet 2012
- **Pratiques pédagogiques** en Octobre 2012

Nous remercions les auteurs d'articles spontanés qui sont toujours de grande qualité. Continuer à nous envoyer des articles pédagogiques : fiches de TP, TD, cours... Nous sommes toujours très intéressés par des articles présentant des études de systèmes avec une approche pluridisciplinaire et nous serons heureux de recevoir vos articles que vous aurez déposés dans la boîte aux lettres dont l'adresse e-mail est revue3ei.art@voila.fr. Nous sollicitons également la participation des amoureux de l'histoire des Sciences ; les articles permettant d'alimenter cette rubrique sont les bienvenus.

Bonne lecture.

Le Comité de Publication de la Revue3EI

Nous comptons sur vous pour faire connaître notre revue afin d'assurer sa pérennité.

La Revue 3EI

Comité de publication

Hamid BEN AHMED

Jean BONAL

Arnaud BRUGIER

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean-Philippe ILARY

Chérif LAROUCI

Marie Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

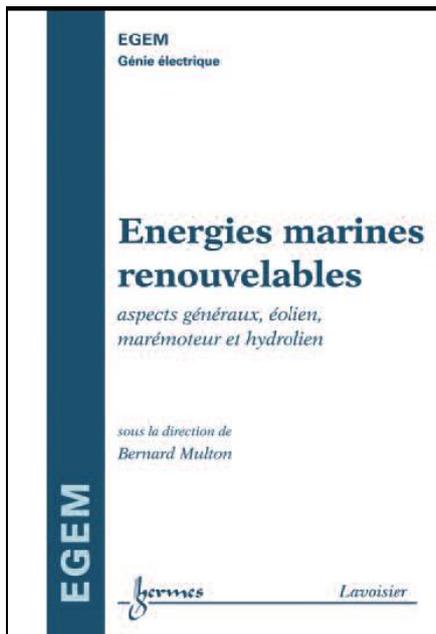
Pascal LOOS

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

Pierre VIDAL



Énergies marines renouvelables

Aspects généraux, éolien, marémoteur et hydrolien
Sous la direction de Bernard Multon

Série Génie électrique (EGEM), dirigée par René Le Doeuff et Jean-Claude Sabonnadière

Editions Hermès

Les énergies marines renouvelables constituent un gisement considérable pour produire de l'électricité et si certaines technologies de conversion ont déjà atteint un certain niveau de maturité, d'autres sont en pleine émergence. L'originalité de cet ouvrage très pluridisciplinaire, premier d'un ensemble de deux volumes, est d'offrir un large spectre de connaissances issues de spécialistes d'origines variées. Sont ainsi traités les aspects aussi généraux que les spécificités et contraintes de l'environnement marin, des notions d'hydrodynamique et de génie océanique et les volets industriels et économiques nécessaires au montage de projets, mais également des aspects plus pointus, comme les éoliennes offshore, les usines marémotrices et les hydroliennes. Ce volume est complété par un autre ouvrage qui traite des houlogénérateurs, de la conversion de l'énergie thermique des mers, des chaînes de conversion statique (fondée essentiellement sur l'électronique de puissance) et des câbles sous-marins de collecte.

Sommaire

Avant-propos - B. Multon

Préface - M. Paillard

- | | |
|---|---|
| 1. Environnement marin et ressources énergétiques | Raymond NERZIC et Jean-Pierre MAZE |
| 2. Contraintes de l'environnement marin | Marc PREVOSTO , Peter DAVIES , Chantal COMPERE et Michel OLAGNON |
| 3. Notions d'hydrodynamique et génie océanique | Aurélien BABARIT , Hakim MOUSLIM et Jean-Marc ROUSSET |
| 4. Énergies marines et acteurs industriels | Guy BESLIN et Jacques RUER |
| 5. Implantation des éoliennes en mer | Jacques RUER |
| 6. Chaînes de conversion des éoliennes offshore | Cristian NICHITA et Brayima DAKYO |
| 7. Production marémotrice | Vincent DE LALEU |
| 8. Concepts, modélisation et commandes des hydroliennes | Mohamed BENBOUZID , Jacques André ASTOLFI , Seddik BACHA , Jean-Frédéric CHARPENTIER , Mohamed MACHMOUM , Thierry MAITRE et Daniel ROYE |
| 9. Paimpol-Bréhat : développement du premier parc hydrolien en France | Pierre BRUN , Laurent TERME et Agnès BARILLIER |
| 10. Retour d'expérience du projet d'hydrolienne Sabella | Jacques RUER |

14, rue de Provigny 94236 Cachan cedex, France • tél.:+33 (0)1 47 40 67 00 • fax:+33 (0)1 47 40 67 02 • e-mail: info@Lavoisier.fr



Journées EEA 2012

de la section électrotechnique du club EEA

UNIVERSITÉ DE CERGY (SITE DE GENNEVILLIERS)

15 ET 16 MARS 2012

Les journées de la section électrotechnique du club EEA rassemblent chaque année la communauté francophone d'enseignement et de recherche en génie électrique et permettent de faire le point sur les évolutions les plus récentes dans un thème clé de cette discipline fondamentalement tournée vers l'énergie.

Traditionnellement, à l'issue de cette manifestation, une table ronde permet de dégager les perspectives, en termes d'enseignement intégrant aussi bien des aspects scientifiques, économiques qu'environnementaux, puisque tous ces aspects sont de plus en plus indissociables.

Le thème de l'édition 2012 est :

"Bâtiment-Energie : quelles contributions du génie électrique ?"

Cette conférence sera organisée à l'Université de Cergy-Pontoise (site de Gennevilliers). A cette occasion, des spécialistes renommés, issus d'un large domaine de compétences, décriront la problématique ainsi que les enjeux associés et mettront à la portée des participants les notions indispensables telles que la modélisation thermique du bâtiment, l'étude du comportement des occupants, les énergies renouvelables dans le cadre du bâtiment, la gestion énergétique.

Par ailleurs, les expériences pédagogiques de collègues, déjà sensibles à cette problématique, feront l'objet d'une session posters et démonstrations.

Dans le secteur du bâtiment ancien, la consommation moyenne annuelle d'énergie est proche de 400 kWh d'énergie primaire par m² chauffé. La contrainte de réduction des émissions de CO₂, mais également la hausse inéluctable du coût de l'énergie liée à l'épuisement progressif des ressources, nécessiteront de parvenir à une consommation moyenne d'énergie primaire de l'ordre d'une centaine de kWh/m² en 2050 pour l'ensemble des bâtiments en service, dont environ 50 kWh/m² d'énergie primaire pour les usages de chauffage de locaux et de l'eau chaude sanitaire.

En France le bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques avec 70 Mtep. Soit 43 % de l'énergie finale totale consommée annuellement par les français. Or, nous avons pris l'engagement de diviser par quatre ces consommations d'ici 2050. Le secteur du bâtiment se positionne dorénavant comme un acteur clé pour parvenir à résoudre les inquiétants défis environnementaux auxquels nous devons faire face. Cette évolution est liée à une prise de conscience récente que ce secteur pourrait bien être le seul qui offre des possibilités de progrès suffisamment fortes pour répondre à nos engagements nationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre. (ADEME)

Ainsi les bâtiments du futur devront être peu consommateurs d'énergie voire autonomes ou même producteurs, répondre à nos besoins quotidiens et assurer un certain confort. Les mots clés pour répondre à cette problématique seront à la fois les bâtiments dits basse consommation, à forte efficacité énergétique, intégrant le pilotage et la gestion énergétique des bâtiments ainsi que les énergies renouvelables.

**PROGRAMME (PROVISOIRE)****15 mars 2012**

- 9H/10H** ACCUEIL
- 10H Introduction
- 10h30** De la passoire thermique aux ilots à énergie positive, un aperçu des défis à relever. M. Jandon - CSTB.
- 11h10** Modélisation thermique du bâtiment, divers niveaux d'approches à considérer. F. Allard - LEPTIAB
- 11H50** Perception de leur environnement par les occupants, N. Roudil – CSTB
- 12H30/14H** - PAUSE DEJEUNER
- 14H-15H30** SESSION POSTER
- 15H30 – 16H** PAUSE CAFE
- 16H** EEA peut-être la clef du confort thermique et des économies d'énergie dans l'habitat!, F. Thellier – PHASE •16H40 Production photovoltaïque dans les bâtiments : retour d'expérience, F. Barruel – INES
- 18H** COCKTAIL

16 mars 2012

- 9H00** La micro-cogénération, R. Daccord et A. Desrentes – EXOES
- 9H40** Nouvelles technologies de l'éclairage et économies d'énergie dans les bâtiments, G. Zissis – LAPLACE. •10H20/10H40 PAUSE CAFÉ
- 10H40** Energy Smart Homes : combiner l'approche centralisée et distribuée, S. Ploix, H. Joumaa - G-SCOP
- 11H20** Gestion du stockage de l'électricité à la convergence des besoins de l'habitat et du transport, C. Grosjean – CEA INES
- 12H/13H30** PAUSE DEJEUNER
- 13H30** Analyse du Cycle de Vie des bâtiments, comparaison bâti-équipements techniques, L. Floissac – LRA.
- 14H10** Retour d'expérience sur la création d'une formation domotique / Immotique, P. Barbel - Univ. Rennes I

Comité d'organisation :

Responsable : Marie Ruellan marie.ruellan@u-cergy.frSecrétariat : Marie-Hélène Moreau Marie-helene.moreau@u-cergy.fr

Les journées du club EEA se dérouleront sur le site de Gennevilliers de l'Université de Cergy Pontoise (30min en RER epuis Paris).

Adresse

Site universitaire de Gennevilliers
Z.A.C des Barbanniers Avenue Marcel Paul 92230 Gennevilliers

Accès au site de Gennevillier :

RER C: arrêt « Gennevilliers »
Metro ligne 13: arrêt « Asnières-Gennevilliers/Les Courtilles »
Bus : lignes 138/166/240/340/378: arrêt « Rond-Point Pierre TIMBAUD »

Modalités d'inscription :

Il est impératif d'envoyer à JEEA2012@ml.u-cergy.fr le bulletin d'inscription (à télécharger sur le site internet : <http://www.u-cergy.fr/fr/ufr-sciences-et-techniques/departement-de-genie-electrique-et-informatique-ndustrielle/actualites/clubeea.html>) et de régler les frais d'inscription.

Les nouvelles technologies de l'éclairage – vers la lumière « électronique »

Georges ZISSIS, David BUSO, Marc TERNISIEN

Université de Toulouse LAPLACE (UMR 5213)
118 route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 9
georges.zissis@laplace.univ-tlse.fr

Résumé : à l'aube du 21^{me} siècle le monde de l'éclairage électrique est à nouveau en effervescence comme il le fût au début du 20^{eme} siècle avec la démocratisation de la lampe à incandescence. Aujourd'hui, pendant que l'incandescence tire sa révérence, nous vivons une vraie révolution grâce à l'arrivée d'un « intrus » venant du monde de l'électronique. En effet, la technologie des sources de lumière est en pleine mutation : les SSLs, à savoir, les diodes électroluminescentes blanches de haute puissance ont envahi le marché et les LEDs Organiques (OLEDs) font des progrès spectaculaires. Cette technologie va-t-elle remplacer les autres sources de lumière et à quelle échéance ?

1. L'importance de l'éclairage et les nouvelles technologies économes en énergie

Aujourd'hui, du point de vue énergétique, l'éclairage consomme plus de 3 418 TWh d'énergie électrique par an [1]. Cette quantité représente approximativement 19% de la production globale d'électricité mondiale. Elle représente une facture annuelle de plus de 200 milliards d'Euros pour le consommateur [2].

Etant donné que l'Homme a une relation très intime avec la lumière, nous avons aujourd'hui la certitude que les besoins en éclairage de l'Humanité ne feront que croître. Ceci est facile à expliquer compte tenu de la croissance à un rythme soutenu de la population mondiale et l'électrification de nouvelles régions du globe désormais éclairées à l'électricité. Par ailleurs le niveau de vie de la population mondiale progresse et comme l'a montré Mills [2] il y a une relation quasi-linéaire entre le produit intérieur brut et la consommation énergétique pour l'éclairage par tête (fig. 1).

On pourrait ainsi s'attendre à un facteur de l'ordre de deux pour les deux décennies à venir, mais il faut toutefois noter que certaines études, tenant compte de l'augmentation de la demande de l'humanité en éclairage, montrent qu'en utilisant simplement de façon plus raisonnée les sources existantes nous pourrions économiser entre 10 et 15 % de l'énergie consommée pour l'éclairage dans la décennie à venir, mais d'autres donnent les résultats inverses...

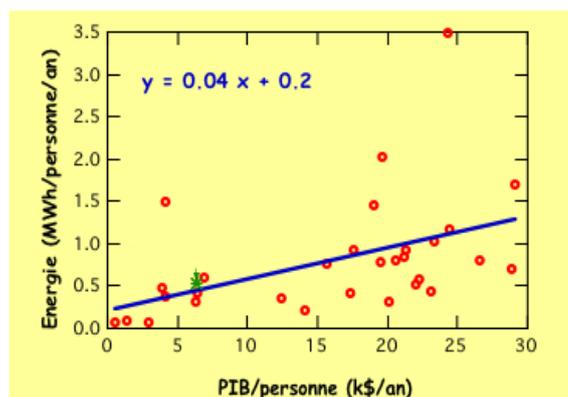


Figure 1 - Une relation remarquable entre le PIB et la consommation énergétique pour s'éclairer [2] : la lumière est un signe extérieur de richesse !

Durant la dernière décennie les gains d'efficacité globale des systèmes d'éclairage des bâtiments ont été principalement dus à la substitution des sources énergivores par des lampes plus efficaces. La « mort annoncée » de l'historique ampoule à incandescence a mis sur le devant de la scène les autres technologies des sources d'éclairage. Cependant, les lampes à décharge (tubes fluorescents, lampes fluorescentes compactes, lampes sodium à haute pression HPS, lampes aux halogénures métalliques MHL) ont une longue histoire. Pour la plupart inventées dans les années 30, elles ont subi tout au long de ces dernières décennies des évolutions significatives qui les placent à des niveaux de performances très importants. Typiquement, leur durée de vie est supérieure à 10 000 heures, elles développent autour de 100 lm/W pour des puissances qui vont de quelques dizaines de watts à quelques kilowatts. Il s'agit de produits matures qui marquent aujourd'hui un pallier dans l'évolution de leurs efficacités. Concevoir et produire en série de nouvelles sources

de lumière plus efficaces semble être une solution durable. Ainsi, une question se pose : Pouvons-nous imaginer d'autres façons pour générer de la lumière au-delà de l'incandescence et à arc électrique ?

La réponse à cette question est simple: Seules deux méthodes, connues depuis l'âge préhistorique, existent pour la conversion de l'énergie à la lumière: l'incandescence et la luminescence, il n'y a rien de nouveau à découvrir dans cette direction !

Toutefois, dans le domaine de luminescence seulement l'émission du rayonnement par les gaz a été exploitée pendant plusieurs décennies, mais le phénomène d'électroluminescence était connu depuis le début du 20^e siècle [6]. L'électroluminescence est l'émission de la lumière directement par la matière à l'état solide suite au passage d'un courant électrique. L'émission dans le domaine du visible par un semi-conducteur polarisé en est l'exemple parfait. Il a fallu attendre les années 2000 pour que les sources de lumière solides (Solid State Lighting – SSL) deviennent des concurrents sérieux aux sources classiques. Ainsi à l'aube du 21^e siècle le monde de l'éclairage électrique est à nouveau en effervescence comme il le fût au début du 20^e siècle avec la démocratisation de la lampe à incandescence. Aujourd'hui, pendant que l'incandescence tire sa révérence, nous vivons une vraie révolution grâce à l'arrivée d'un « intrus » venant du monde de l'électronique. En effet, la technologie des sources de lumière est en pleine mutation : les SSLs, à savoir, les diodes électroluminescentes blanches de haute puissance ont envahi le marché et les LEDs Organiques (OLEDs) font des progrès spectaculaires. Cette technologie va-t-elle remplacer les autres sources de lumière et à quelle échéance ?

La question est loin d'être tranchée. Pour y répondre, il faut prendre en compte non seulement des considérations technologiques, mais, il faut surtout placer ces technologies dans les contextes énergétiques et économiques contemporains. Cependant, le monde de l'éclairage subit une pression considérable afin d'amortir les investissements. Souvent, au détriment de l'utilisateur final, qui risque d'être déçu irréversiblement par des produits de piètre qualité qui polluent le marché et des affirmations à la limite du mensonge qui portent tort à une technologie prometteuse qui entre dans son ère de maturité.

2. Les diodes électroluminescentes, promesses et réalités.

La technologie LED peut sûrement faire avancer les choses dans la bonne direction. La question est comment. Pour y répondre, R. Haitz et coll. [5], dans le cadre d'un « papier blanc » commandé par le Sénat des Etats-Unis, ont élaboré deux scénarios: le premier, simplement « évolutionnaire », prévoit pour 2010 une diode blanche de 50 lm/W, tandis que le second, dit « révolutionnaire », vise un composant de 200 lm/W d'ici 2025. La figure 2 montre ces deux scénarii.

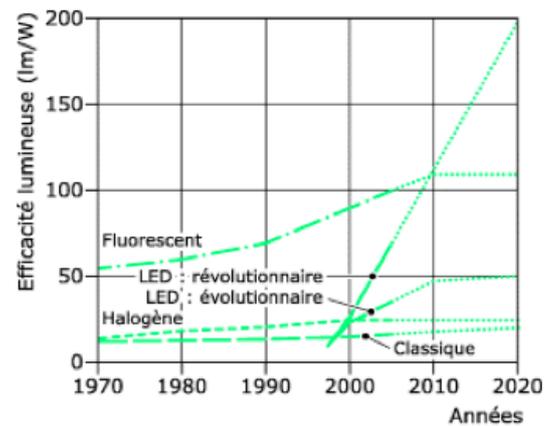


Figure 2 - Deux scénarii développés par R. Haitz en 2000 pour prévoir l'évolution de l'efficacité lumineuse des LEDs

Au moment de la publication du rapport de Haitz, les 50 lm/W prévus par le premier scénario semblaient être un objectif réaliste que l'on pouvait atteindre sans effort considérable tandis qu'atteindre une efficacité de 200 lm/W nécessitait clairement un effort considérable. En 2011, l'évolution de la technologie a plutôt suivi, et même dépassé de loin, le scénario dit «révolutionnaire».

L'éclairage deviendra ainsi la cible ultime pour les LEDs. Cela offrit une voie de croissance inespérée à l'industrie du semi-conducteur déprimée par la crise des télécommunications vers la fin du 20^e siècle. Incités par l'industrie, les pouvoirs publics consentiront à de vastes investissements dans la R&D pour la réalisation de systèmes d'éclairage à LEDs fiables et efficaces. Aujourd'hui, tous les indicateurs montrent que la phase de maturation touche à sa fin. Ainsi, les performances des LED blanches, destinées aux applications de l'éclairage, se surpassent sans cesse, les records sont battus régulièrement : le 16 mai 2011, l'américain Cree annonçait une LED blanche (blanc froid) de puissance avec une efficacité de 231 lm/W à 350mA et 25°C. Toutefois, malgré tous les progrès achevés, en 2010 la part des systèmes à LEDs dans le marché de l'éclairage général se

cantonnait à moins de 2%, nous sommes encore loin des ces prévisions, mais rien n'est impossible !

Vu l'évolution de la technologie, nous parlerons aujourd'hui de trois familles de LEDs. Le tableau 1 donne un bref aperçu des caractéristiques de chacune de ces familles.

<p>LEDs conventionnelles (faible puissance)</p> <p>Domaine d'application privilégié : applications nomades et signalisation</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Surface de la jonction : 350x350 μm^2 • Alimentation : 30 mA, 3,5 V • Puissance <200 mW • Efficacité Quantique Externe ~20% • Flux lumineux : 1 – 3 lumens • Efficacité lumineuse (pour diodes blanches) 20 lm/W • Encapsulation époxy (en dôme)
<p>HB-LEDs forte luminosité (forte puissance)</p> <p>Domaine d'application privilégié : retro-éclairage, automobile, éclairage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Surface de la jonction : 1x1 mm^2 • Alimentation : 350 mA, 3,5 V • Puissance max 1 W • Efficacité Quantique Externe >30% • Flux lumineux 5 - 30 lumens • Efficacité lumineuse (pour diodes blanches) > 30 lm/W • Encapsulation spécifique
<p>UHB-LEDs très forte luminosité</p> <p>Domaine d'application privilégié : éclairage général</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Surface de la jonction : 2x2 mm^2 • Densité surfacique de courant > 50 A/cm^2 • Puissance max 5W • Efficacité Quantique Externe >30% • Flux lumineux > 100 lumens • Efficacité lumineuse (pour diodes blanches) 50 lm/W • Encapsulation spécifique

TABLEAU 1 – LES FAMILLES DES LEDs CONTEMPORAINS

Il est possible de classer également les LED par leur spectre lumineux (Figure 3) :

- les LEDs de couleur: leur spectre est quasiment monochromatique, leur domaine d'application est celui de la signalétique, de l'éclairage scénique et décoratif ;
- les LEDs blanches: leur spectre est constitué de plusieurs longueurs d'ondes. Leur domaine d'application est celui de l'éclairage.

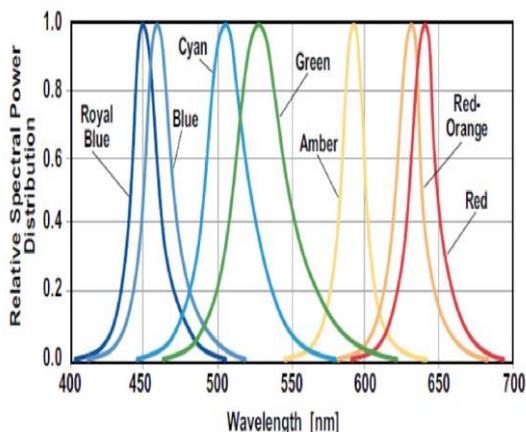


Figure 3a - Spectre des LEDs de couleur

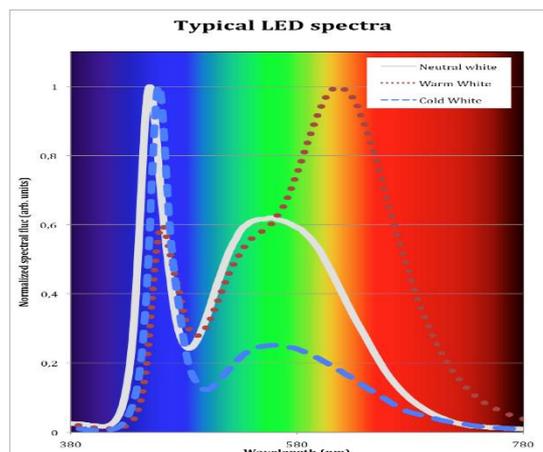


Figure 3b - Spectre des LEDs blanches

En ce qui concerne l'éclairage, il faut dissocier les LEDs en tant que composants des systèmes d'éclairage à LEDs. Ceci est nécessaire pour plusieurs raisons : (1) l'éclairage n'est qu'une des applications des composants LEDs (2) le comportement d'une LED intégrée dans un système est complètement différent de celui d'une LED isolée. Les paragraphes qui suivent donneront quelques points « faibles » des LEDs et qu'il faut absolument intégrer dans le design d'un système d'éclairage.

La chaleur est l'ennemi numéro 1 des LEDs, notamment des diodes blanches. Un fonctionnement des LEDs à trop haute température a des conséquences dramatiques sur les performances et caractéristiques des LEDs. Le flux, la tension de fonctionnement, l'efficacité lumineuse, le spectre et les caractéristiques colorimétriques, la durée de vie et la fiabilité sont sévèrement affectés. Pour donner un exemple un luminaire utilisant une LED blanche commerciale de bonne qualité ayant une efficacité lumineuse certifiée de 110 lm/W pour un courant de 350 mA et à une température de jonction de 25°C, intégrée dans le luminaire sa température augmentera rapidement et l'efficacité finale du système peut s'effondrer autour de 60-70 lm/W, voire beaucoup moins si la température de la jonction dépasse les 100°C. Nous savons aussi que plus de 50% des défaillances prématurées des LEDs sont liées à la température. Pour garantir des bonnes performances globales, l'élément clef du système est le dissipateur thermique. En effet, pour une puce LED ayant une consommation électrique théorique de 1W, une faible partie de cette puissance (jusqu'à 30% pour une très bonne LED blanche) est réellement transformée en lumière le reste c'est de la chaleur. Etant donné, qu'une LED n'émet pas de rayonnement infrarouge, l'excédent de chaleur doit être évacué vers l'extérieur par conduction-convection, d'où le besoin du dissipateur thermique.

En ce qui concerne la durée de vie, voici quelques années les constructeurs avançaient pour leurs LEDs une durée de vie de 100 000 h et ce n'est toujours pas rare d'entendre les fabricants des luminaires à LEDs avancer des durées de vie allant jusqu'à 30 000h. Toutefois, ils ne précisait pas la définition qu'ils utilisaient pour définir cette valeur. S'agissait-il d'une durée de vie moyenne, médiane, économique ; celle de la jonction nue, ou celle dans un luminaire quelconque ? En effet, la durée de vie d'une LEDs reste encore une notion assez floue, mais des travaux de normalisation sont en cours et les industriels réalisent de plus en plus de campagnes de tests, plus rigoureuses et réalistes.

Dans le système il ne faut pas oublier l'alimentation électrique. Les LEDs sont avant tout des semi conducteurs que l'on polarise et au travers desquels il faut faire passer un courant. Cela signifie que le paramètre qui va piloter la LED, donc le flux lumineux émis, est le courant et non la tension. Nous pourrions même envisager de dire que la tension aux bornes de la LED n'est que le résultat du courant qui la traverse. Ainsi, on se rend bien compte que la seule vraie façon d'alimenter une LED est de fixer le courant qui la traverse et non pas la tension à ses bornes (sans toutefois mettre ce paramètre aux oubliettes). Néanmoins, beaucoup de circuits électroniques alimentant des LEDs fonctionnent en tension, c'est-à-dire que pour un courant donné dans les LEDs, une résistance de régulation va être mise en série avec celles-ci et l'alimentation appliquera une tension aux bornes de l'ensemble. Cette méthode peu chère est peu efficace et surtout, ne protège en rien les LEDs contre un éventuel emballement thermique: Une jonction semi-conductrice a la propriété de voir sa tension de seuil baisser linéairement avec la température. On appelle cet effet le « voltage drop » ou chute de tension d'une diode. Comme le montre Paul Messaoudi du CEA-LETI [6] une variation de température de jonction de 100°C pourrait provoquer une dérive de la tension de seuil de -160 mV ; bien que cette dérive soit en valeur absolue faible, sur une diode, elle provoquera un fort gradient de courant d'où une variation de puissance lumineuse également très forte. Avec les alimentations électroniques il existe un autre problème récurrent: la fluctuation de la lumière (flicker). La fluctuation est liée à la variation du courant injecté dans la LED. Pour une source de courant parfaite cette fluctuation est strictement nulle, mais c'est une configuration idéale. En réalité, le filtrage lié à l'étage de redressement ac/dc joue un rôle fondamental. Si la qualité de filtrage n'est pas suffisante (c'est souvent le cas des alimentations « bon marché ») la fluctuation

résiduelle du courant se transforme en une fluctuation de la lumière à une fréquence de 100 Hz (120Hz aux USA). Cette fluctuation de la lumière pourrait provoquer dans les pires de cas des crises d'épilepsie photosensible et en interférant avec des mouvements des effets stroboscopiques pouvant compromettre la sécurité de l'utilisateur final. La figure 4 montre le taux de fluctuation de la lumière à 100 Hz mesuré dans le cadre d'une étude ANSES par le LAPLACE pour plusieurs lampes à LED commerciales en fonction de la tension d'alimentation. Nous pouvons constater que pour plusieurs cas le taux dépasse largement les 15% et il est par conséquent perceptible.

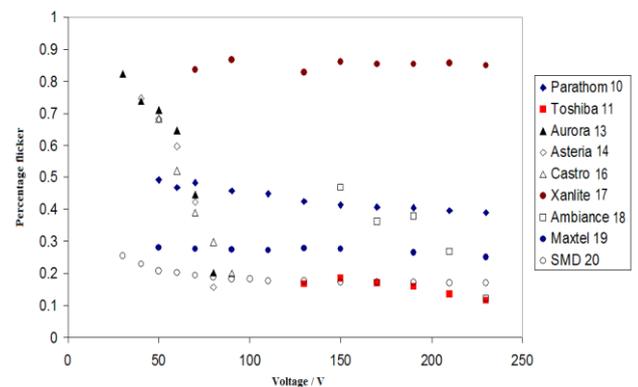


Figure 4 - Taux de modulation de la lumière à 100 Hz en fonction de la tension d'alimentation des lampes à LED

Un autre grand défi pour les systèmes d'éclairage à LEDs est la qualité. C'est un paramètre très souvent négligé dans la discussion sur les vertus des LEDs. Cependant, il s'agit d'un paramètre primordial qui conditionne la fiabilité d'un système d'éclairage et qui assure l'acceptabilité par l'utilisateur final. Aujourd'hui, des efforts au niveau mondial sont consentis afin d'aboutir à un système normalisé définissant les critères de qualité et leurs méthodes de mesure (cf. Initiative IEA-4E-SSL, consortium Zhaga, etc.). Par ailleurs, des campagnes nationales et internationales de mesures de qualité des systèmes à LEDs sont entreprises. Les résultats obtenus sont souvent très décevants et alarmants (voir figure 5).

Ce constat est fort inquiétant car les LEDs de mauvaise qualité qui existent aujourd'hui sur le marché discréditent l'ensemble des produits aux yeux des concepteurs lumière et aussi des utilisateurs finaux. Un rejet du produit par l'utilisateur final peut être très dommageable pour une technologie éprouvée. Toutefois, depuis 2-3 ans nous constatons une augmentation générale de la qualité, mais, encore beaucoup de mauvais produits « pas chers » polluent le marché.

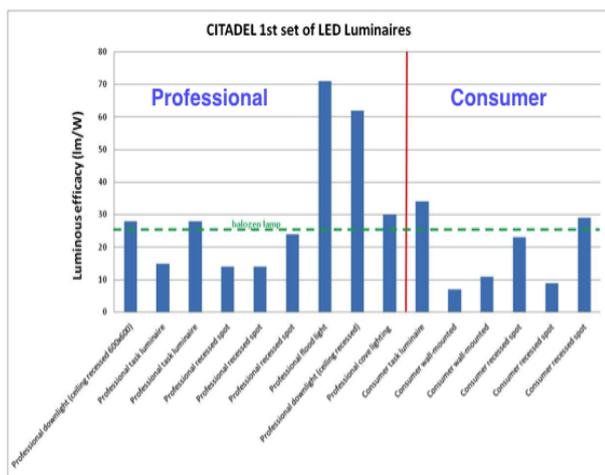


Figure 5 - Efficacité lumineuse mesurée par le consortium CITADEL à partir de produits LEDs achetés de façon anonyme dans le marché Français. La ligne pointillée verte correspond à l'efficacité de lampe halogène dernière génération

L'autre aspect omniprésent dans les développements industriels notamment, consiste à diminuer les coûts de fabrication, point que nous n'aborderons cependant pas dans le cadre de cet article. Notons au passage, que le prix des systèmes à LEDs diminue rapidement et il est fort possible qu'à l'horizon 2025 une lampe à LED coûtera aussi peu cher qu'une lampe à économie d'énergie.

Par ailleurs, il est absolument nécessaire de faire de véritables analyses de cycle de vie (ACV) selon les normes ISO 14040 et 14044 (dites « du berceau à la tombe ») afin de mieux cerner l'impact environnemental des LEDs, qui pour le moment est encore moins bon que celui des lampes à économie d'énergie (figure 6).

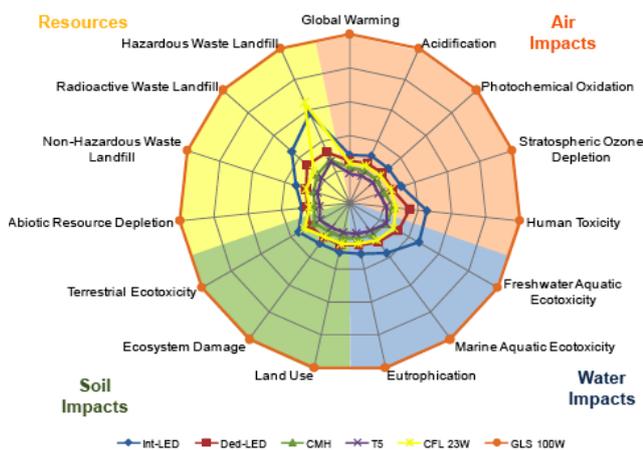


Figure 6 - Évaluation des impacts relatifs des différents types de lampes (GLS: l'incandescence, CFL: lampe fluorescente compacte, T5: Tube fluorescent linéaire, CMH: lampe céramique à halogénures métalliques de faible puissance.; LED avec fixation dédié sans ballast, int-LED: LED avec ballast intégré [7]

Enfin, il faut d'intégrer dans notre réflexion les aspects qualité de la lumière. La définition de l'indice de rendu de couleur doit être revue, le

papillotement de lumière doit disparaître, la composante bleue sortant directement de puce LED doit s'estomper car toxique, à forte dose, pour la rétine, l'éblouissement doit être limité etc.

L'amélioration prévue des performances des LEDs, l'établissement des nouveaux standards de qualité, la définition des nouvelles méthodes de métrologie, l'amélioration de la fiabilité et la baisse de prix nous donnent un aperçu des innovations et des possibilités que permettront les LEDs de demain. Des pistes sont déjà défrichées où les luminaires s'adapteraient automatiquement aux besoins de son utilisateur dans leur zone d'éclairage, communicants si besoin avec leurs voisins, exemple parmi bien d'autres plus futuristes encore.

3. Les diodes électroluminescentes organiques, le future de l'éclairage intérieur ?

Pendant que ces quelques sujets listés dans le paragraphe précédent occuperont les spécialistes durant les années à venir, les LEDs Organiques (OLEDs) arrivent et une nouvelle aventure s'annonce.

Les découvertes de la conduction des films de polyacétylène en 1977 par A. Hegger, A. McDiarmid et H. Shirakawa (prix Nobel 2000) [8] et la réalisation de la première diode électroluminescente organique par Tang et Van Slyke pour la société Kodak, une décennie plus tard, ont rendu possible l'émergence de l'utilisation des matériaux organiques à des fins commerciales dans des objets de la vie quotidienne [9].

Tout comme le plastique, l'OLED est fabriquée à base de matériaux moléculaires π -conjugués (présents dans des cycles aromatiques comme le benzène), c'est-à-dire comportant une alternance de simples et doubles liaisons. Dans le cas de la molécule de polyacétylène la conductivité électrique à l'état neutre (c'est-à-dire isolante) est inférieure à 10^{-5} S/cm. Lorsqu'on lui retire ou rajoute des électrons par dopage chimique, on peut alors augmenter de huit ordres de grandeur cette valeur de conductivité. Une OLED présente une structure relativement simple à savoir des matériaux organiques qui sont pris en « sandwich » entre une anode généralement transparente (ITO) déposée sur du verre et une cathode métallique soumises à une différence de potentiels (figure 7). Chaque matériau va avoir un rôle bien précis. Certains d'entre eux auront la charge d'améliorer l'interface entre la molécule et le métal dans le but d'optimiser l'injection de charges.

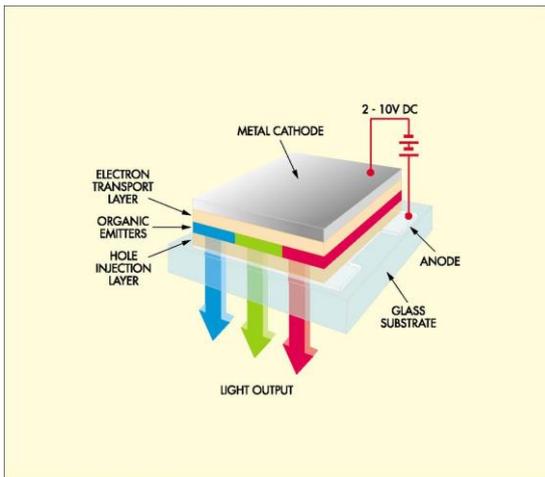


Figure 7- Structure simplifiée d'une OLED blanche

Lorsqu'une différence de potentiels est appliquée entre l'anode et la cathode, un courant va circuler permettant ainsi à la cathode de fournir des charges négatives (électrons) et à l'anode des charges positives (trous). Un polaron négatif va ainsi être créé et va se déplacer vers l'anode sous l'action du champ électrique imposé par la différence de potentiel appliquée. En effet l'électron est injecté dans la "bande de conduction", appelée LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital), correspondant à la plus basse orbitale π^* inoccupée de la molécule. Parallèlement, un électron est arraché d'une molécule proche de l'anode, laissant derrière lui un trou dans la "bande de valence" appelée HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital), la plus haute orbitale π occupée par une paire d'électrons donnant ainsi naissance à un polaron positif. Ces deux porteurs de charges vont se déplacer Hopping (saut) de molécule en molécule dans tout le matériau jusqu'à leur rencontre. Lorsque cette rencontre a lieu, un "exciton" (ou une paire électron-trou) est formé. Le rayonnement est alors créé suite à la recombinaison et à la désexcitation de l'exciton. Ce mécanisme de fluorescence est le mécanisme de base d'émission de lumière dans les OLEDs. En effet, le photon ainsi créé aura une énergie égale à la différence énergétique (appelé gap comme pour les semi-conducteurs classiques) entre les niveaux HOMO et LUMO du matériau utilisé. La plupart des rayonnements émis par les OLEDs se trouvent dans le domaine du visible.

Les OLEDs blanches (WOLEDs pour White OLEDs) sont des sources de lumière dont l'émission spectrale recouvre entièrement ou partiellement le domaine visible du spectre électromagnétique. Comme les OLEDs habituelles, elles contiennent des couches d'injection, des couches de transport, des matrices ainsi que les émetteurs ou dopants [12]. Les avantages des

OLEDs blanches par rapport aux sources blanches classiques sont :

- Une faible consommation électrique,
- Un rendement très important (100% en rendement interne avec des émetteurs phosphorescents),
- Une flexibilité au niveau du substrat (plastique, verre, textile), au niveau des couleurs
- Un Indice de Rendu des Couleurs (CRI) potentiellement proche de 100,
- Un procédé de fabrication à bas coût.
- Une moindre sensibilité à la température que les LEDs
- Une source de lumière à étendue avec une émission omnidirectionnelle quasi Lambertienne

Il existe plusieurs techniques pour obtenir de la couleur blanche à partir des OLEDs multicouches. Ces techniques nécessitent d'associer plusieurs émetteurs organiques distincts, fluorescents et ou phosphorescents, dans une même structure de diode électroluminescente afin d'obtenir une couverture spectrale large et un blanc « pur ».

Les principaux verrous actuels sont essentiellement liés à l'encapsulation et l'extraction de la lumière. En effet, même si la durée de vie des OLEDs est en hausse, ces composants sont toujours sensibles à la fois à l'oxygène et à l'humidité. Par conséquent, de nombreuses études ont été réalisées sur la manière d'encapsuler ces composants. De manière industrielle, la méthode la plus connue est l'utilisation de polymères déposés au dessus de l'OLED avec des « getters » qui servent à détecter la présence d'eau. L'encapsulation est primordiale car elle aura une part importante dans la durée de vie et dans le fonctionnement du composant dans les applications éclairagistes par exemple. L'autre verrou concerne l'extraction de la lumière. En effet, la génération de la lumière est régie par la recombinaison d'une paire électron trou qui donne naissance à un photon. Mais lors de son passage vers l'extérieur, le photon connaît de multiples pièges dus aux différents modes guidés existant. Il faut donc aussi tenir compte de la qualité de l'extraction des 25% de photons radiatifs de telle façon à obtenir des caractéristiques exploitables. Ce sujet est toujours d'actualité aussi bien en recherche académiques qu'industrielles.

La recherche dans le domaine des sources de lumière du futur est essentiellement menée par les grandes multinationales de l'éclairage que sont Philips (Pays Bas), Osram et Novald (Allemagne), General Electric et Universal Display Corporation

(Etats-Unis), et également par les industries du sud-est asiatique (Sony, Samsung, LDT,...). Les performances désormais atteintes laissent percevoir des utilisations pour l'éclairage d'ambiance. Beaucoup de recherches sont encore réalisées même si des prototypes sont sortis comme c'est le cas de la Lumiblade™ de Philips et l'Orbeos d'Osram™ (Figure 8).

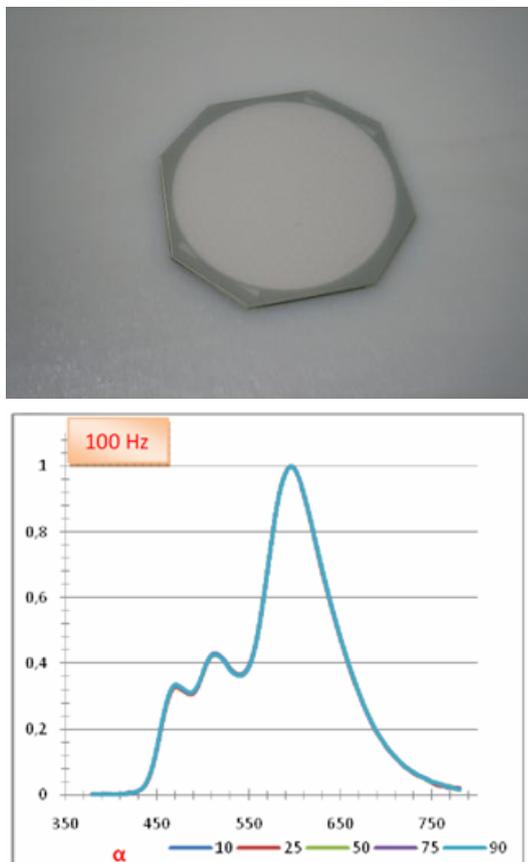


Figure 8 - OLED Orbeos™ d'Osram (surface émissive 49 cm²) et son spectre sous alimentation pulsée (LAPLACE, projet OLED-Diag)

La technologie OLED ayant un fort potentiel d'expansion dans le domaine de l'éclairage d'intérieur, il est donc essentiel de prendre les devants du marché, d'étudier ces nouvelles sources de lumière et ainsi de prévoir des conseils à l'utilisateur, des recommandations aux fabricants et également de planifier des critères de labellisation. Il est donc impératif que des institutions indépendantes (bureaux d'étude, laboratoires universitaires) mettent en place des outils de diagnostic adaptés aux spécificités des OLED, de façon à évaluer les performances, en termes d'efficacité énergétique et de qualité de lumière, de ces sources en pleine expansion.

4. Quelques questions en guise de conclusion

Que nous réserve le futur ? Est-ce que les SSLs deviendront les sources de lumière dominantes ? Est-ce que nous arriverons à maîtriser la demande de l'énergie pour l'éclairage ?

Difficile de répondre de façon absolument certaine à ces interrogations, ce qui est sûr, c'est le fait que pour mieux satisfaire nos besoins il faut une approche holistique du système. Ceci permettrait l'exploration du vrai potentiel des nouvelles technologies.

De plus, il ne faut jamais oublier que le système d'éclairage futur issu de ce processus d'optimisation holistique doit évidemment satisfaire les besoins en lumière, mais il doit respecter les ressources énergétiques et environnementales, contribuer à la qualité de vie de l'Homme et être au service de l'utilisateur. Ainsi, si l'on veut réussir le pari d'un meilleur système d'éclairage, économe, respectueux de l'environnement et contribuant à l'amélioration de la qualité et le confort de vie, nous devons traiter tous les aspects d'un système complexe, ce qui ne peut se faire que par le biais d'une étude vraiment pluridisciplinaire.

Bibliographie

- [1] Brown LR. *Plan B 4.0: Mobilizing to Save Civilization*, W.W.Norton & Company, New York (2009)
- [2] Mills P., "Why we're here: The \$230-billion global lighting energy bill", Proc. 5th Right Light Conference, pp. 369-385, Nice (France), May 2002
- [3] Report on Solid-State Lighting Research and Development Multi-Year Program Plan, US-Department of Energy, March 2011
- [4] Archenhold G., *Integrated System Technologies*, 2010
- [5] Haitz R., Kish, F., Tsao J., *Compound Semiconductor Magazine*, vol. 6, No. 2. March 2000
- [6] Messaoudi P., *ASPROM-Veille Technologique*, n° 38, Août/Septembre 2010
- [7] Navigant Consulting Europe, *Life Cycle Assessment of Ultra-Efficient Lamps*, Published by the Department for Environment, Food and Rural Affairs, May 2009
- [8] Chiang C K, Fincher C R, Park Y W, Heger A J, Shirakawa H, Louis E J, Gau S C and MacDiarmid A G., *Phys. Rev. Lett.* vol. 39 1098 (1977)
- [9] Tang, C. W. & VanSlyke, S. A. *Appl. Phys. Lett.* vol. 51, 913-915 (1987)

Etude comparative de trois technologies de lampes d'éclairage

Jean-François SERGENT

Université Lille 1

Cité Scientifique 59655 Villeneuve d'Ascq

jean-francois.sergent@univ-lille1.fr

Résumé : On présente ici une série d'activités pédagogiques ayant pour thème l'éclairage. Elle s'adresse à des étudiants de L2 (deuxième année de Licence d'Ingénierie Electrique) issus pour la plupart d'un bac scientifique. L'objectif global est de les initier à l'étude de constituants électriques en s'appuyant sur les concepts physiques sous-jacents avec comme souci constant de caractériser ces composants en tant bien sur qu'éléments de conversion d'énergie (point de vue utilisateur,) mais également en tant que récepteurs électriques (point de vue fournisseur d'énergie).

1. Rappels

Au plan mondial, l'éclairage représente à peu près 19% de la consommation d'électricité et une émission d'environ 2 Gt de CO₂, chiffres attestant d'un impact non négligeable au plan environnemental. En France, l'éclairage représente plus de 10% de la consommation ; avec la bureautique c'est d'ailleurs l'un des tous premiers postes de consommation pour le secteur tertiaire. Dans un contexte où on évoque de plus en plus une réduction indispensable de notre consommation d'énergie, le remplacement des lampes à incandescence par des lampes plus efficaces apparaît aujourd'hui comme une solution incontournable en particulier pour le secteur résidentiel.

2. Présentation de la séquence pédagogique.

2.1. Organisation pédagogique

Au cours du quatrième semestre de la licence, les étudiants inscrits en LIE suivent une unité intitulée « Introduction au Génie Electrique », l'objectif est de les sensibiliser aux applications majeures de l'électricité (force motrice, électrothermie, éclairage) en s'appuyant sur des produits de la vie courante ; l'étude de systèmes industriels, plus complexe, est quant à elle placée au semestre 6 (second semestre de L3). Les notions physiques (Cf. [1], [6]) et technologiques indispensables à l'appropriation des différents concepts sont introduites au fur et à mesure des besoins. L'ensemble des connaissances s'articulent autour de séances de cours-TD suivies de travaux pratiques et enfin d'un avant-projet incluant une phase d'étude et de réalisation.

Pour le thème « Eclairage », nous avons retenu 3 lampes à culot E27 du commerce de forme similaire et de dimensions voisines, elles donnent un flux lumineux sensiblement identique.



Figure 1 – Lampes étudiées (Halogène à gauche LED à droite, fluo-compacte en bas)

Le tableau 1 résume les caractéristiques essentielles des trois produits étudiés. La lampe à filament est de type « halogène » avec un filtre infrarouge permettant le maintien à une température élevée du filament tout en diminuant légèrement la consommation. La version à diodes électroluminescentes de puissance (20 puces Nichia [2], [3]) affiche une température de couleur sans doute un peu élevée pour un éclairage intérieur (5 000 K), mais permet de disposer d'un flux comparable aux deux autres types, en effet la version en teinte chaude (2 950K) n'offre qu'une efficacité lumineuse de 65lm/W, valeur inférieure à celle du modèle choisi (Cf. figure 13).

	Fabricant	Puissance (W)	Flux (lm)	Prix (€)	Durée de vie (h)	TC (K)	IRC	Masse (g)	Facteur de puiss.
Halogène	Philips	52	850	3,20	2 000	2 800	> 95	26	1
Fluo-compacte	Philips	16	875	9,45	10 000	2 700	82	86	0,57
LED	Fawoo	10	820	55	30 000	5 000	72	262	> 0,9

Tableau 1 – Caractéristiques principales des trois lampes étudiées –

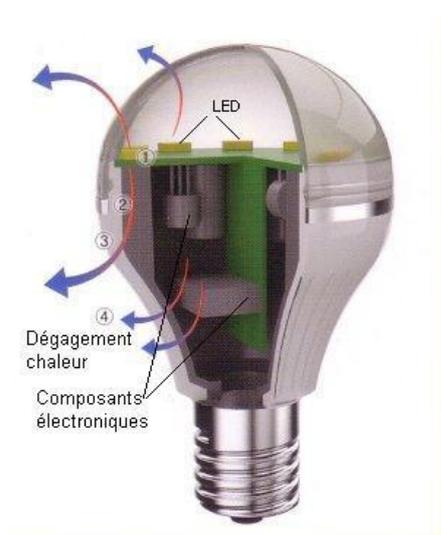


Figure 2- Lampe LED (Lumidas-B)

La séance de cours permet d'introduire les notions minimales nécessaires à la lecture et à l'exploitation des informations fournies par les fabricants ainsi qu'au bon déroulement des TP. Nous nous limitons donc aux définitions et aux calculs, de l'intensité lumineuse, du flux lumineux, de l'éclairage, de la température de couleur (TC) et enfin de l'indice de rendu des couleurs (IRC).

2.2. Exemple de travaux dirigés

Un premier travail consiste en la comparaison des caractéristiques électriques et photométriques des trois technologies [3], [4]. En s'appuyant sur le principe des LED blanches, on pourra ainsi justifier la valeur élevée de la température de couleur (pic d'émission vers les longueurs d'onde proches du bleu cf. fig.3).

Un exercice complémentaire permet ensuite de comparer leurs performances économiques. A partir

d'informations comme le coût de l'électricité, la durée de vie moyenne des lampes, il est demandé aux étudiants de compléter le tableau 2 et de commenter les résultats.

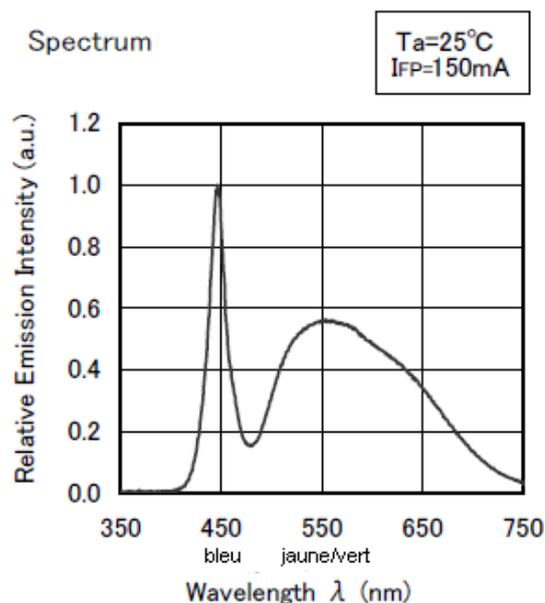


Figure 3 – Spectre d'émission d'une LED [3]

A l'évidence on constate que si le coût initial du lumen (C1) est toujours à l'avantage de l'incandescence, le coût final (C2) plaide nettement en faveur des deux autres technologies, l'écart serait encore plus significatif si on prenait en compte la hausse prévisible de l'électricité. On peut ajouter que la technologie fluo-compacte reste, pour l'instant, la mieux placée mais à terme sa nocivité (présence de mercure, rayonnement électromagnétique) ainsi que la baisse des coûts de fabrication des lampes LED la condamne probablement à disparaître (certains fournisseurs annoncent pour 2012 des lampes LED de 10W à moins de 15€...).

	Cout lumen C1 (c€/lm)	Nombre lampes	Cout total consommation (€)	Cout achats	Cout cumulé	Cout final lumen C2 (c€/lm)	Ratio C2/C1
Halogène	0,38	15	151,3	48	199,3	23,5	61,7
Fluocompacte	1,08	3	46,6	28,35	74,9	8,56	7,9
LED	6,71	1	29,1	55	84,1	10,26	1,53

Tableau 2 - Performances comparées au plan économique –

3. Présentation de la séance de travaux pratiques.

3.1. Objectifs généraux

Au cours de cette séance de quatre heures les étudiants devront caractériser les trois technologies envisagées, par rapport à l'usage (éclairage fonctionnel en résidentiel), et par rapport au comportement en tant que récepteur électrique.

3.2. Mesures photométriques

Précisons tout d'abord que ces mesures sont toujours délicates (précision des luxmètres, influence des spectres des sources, perturbations dues aux opérateurs...). Avec un matériel classique, donc peu onéreux, il ne faut pas s'attendre à des résultats précis mais plutôt des ordres de grandeur. Pour comparer les performances des trois lampes, l'idéal serait de disposer d'une sphère d'intégration, ce type de matériel étant coûteux et d'un usage délicat, nous nous contenterons ici de mesures d'éclairage sur un plan horizontal. Afin de s'affranchir de l'éclairage ambiant, ces mesures sont faites dans un petit local indépendant. Les lampes sont insérées dans un luminaire à environ 2 m du sol. On mesure l'éclairage horizontal tous les 25 cm suivant deux directions en quadrature.

A défaut on peut prévoir un boîtier opaque d'encombrement réduit à l'intérieur duquel les lampes seront placées ; dans ce cas on prévoira un système de ventilation afin de limiter la température interne.

Pour la tension nominale, on mesure l'éclairage horizontal en une quinzaine de points ; le luxmètre retenu (modèle LX108 vendu par la société Française d'instrumentation) permet de choisir entre différentes types de sources lumineuses (éclairage incandescent, fluorescent, à décharges). Il convient donc pour deux des technologies étudiées mais n'est pas prévu pour des

lampes LED (la société Konica propose un luxmètre, CL-200A, adapté aux LED mais à un prix élevé). Par défaut nous effectuons donc les mesures sur la position « lampes au mercure » (lampe à décharge à haute pression). Pour la lampe fluocompacte, il est en outre demandé de relever l'éclairage à la verticale de lampe durant le régime transitoire. Enfin à l'aide d'un autotransformateur, il est également demandé d'étudier l'influence de la tension sur le flux fourni par les lampes.

3.3. Mesures électriques

Grace à une pince multifonctions (VA21), les étudiants relèvent les grandeurs électriques suivantes :

- la valeur efficace de la tension
- l'intensité efficace du courant
- la puissance moyenne
- le facteur de puissance
- le taux de distorsion harmonique du courant
- les premiers harmoniques de courant

On analyse également l'influence des variations de tension sur la puissance consommée par chaque lampe.



Figure 4 - Matériel de mesure –

3.4. Observations à l'oscilloscope

En utilisant deux sondes d'isolation et un oscilloscope numérique, les étudiants relèvent l'allure du courant, de la tension appliquée et celle de la puissance instantanée. Il leur appartient bien entendu de commenter ces formes d'onde. Les justifications de l'allure du courant et de la puissance instantanée porteront uniquement sur la lampe à incandescence. En effet à ce stade ils n'ont pas les pré-requis nécessaires pour expliquer, par exemple, l'allure du courant appelé par la lampe LED (alimentation à découpage munie d'une régulation du courant en sortie).

3.5. Mesures thermiques

Un thermomètre à infrarouge étant fourni (Fluke 561), il est également demandé de relever en fonctionnement, la température du culot, ainsi que la température de surface du bulbe ; pour la lampe à incandescence, cette mesure est faite juste après l'extinction (rayonnement du filament).

4. Présentation et commentaires des résultats

4.1. Analyse des relevés photométriques

Hormis le point d'origine passant par l'axe optique de la lampe, les deux modèles fluo-compacte et halogène donnent des valeurs d'éclairages très voisines ce qui justifie pleinement les informations d'équivalence fournies par les fabricants.

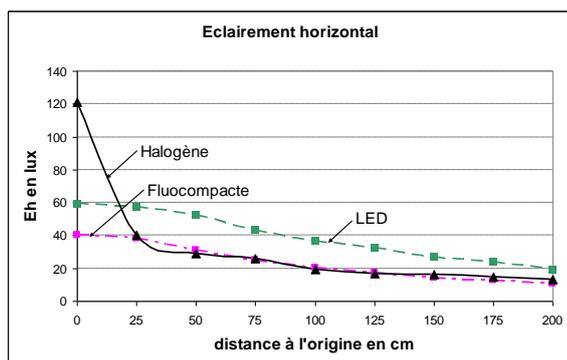


Figure 5 – Relevés de l'éclairage au sol –

Pour ce qui concerne la lampe LED l'éclairage horizontal est plus élevé, en effet vu sa forme hémisphérique, le flux est plutôt dirigé vers le bas (Cf. figure 6). Pour obtenir des éclairages équivalents dans les trois cas, un luminaire avec une face interne à haut pouvoir de réflexion constituerait sans aucun doute une amélioration du protocole de mesure.

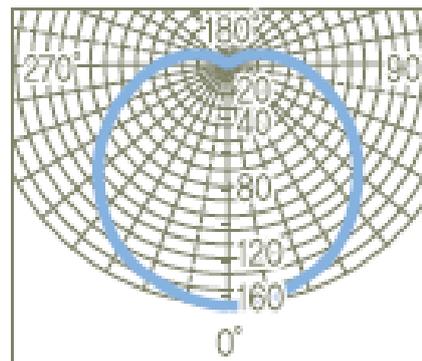


Figure 6 – Courbe photométrique (Lumidas-B)

La figure 7 nous montre l'évolution de l'éclairage à la mise sous tension de la lampe fluo-compacte. Le régime transitoire dure environ deux minutes et les 60% du flux nominal sont atteints en moins de 30 secondes conformément aux annonces du fabricant. La lenteur pour atteindre le régime permanent est considérée comme rédhibitoire par beaucoup d'utilisateurs.

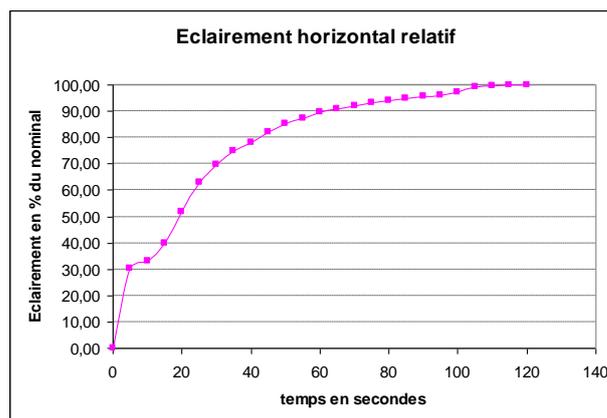


Figure 7 - Régime transitoire de la lampe fluo-compacte -

4.2. Analyse des mesures électriques

Au vu du tableau 3 on constate une fois encore que les grandeurs affichées par les fabricants sont respectées, ceci n'est probablement pas le cas des produits « bas de gamme » qui inondent certaines enseignes...

Le facteur de puissance quasi unitaire de la lampe à filament est évidemment dû à la faible inductivité de celui-ci à 50Hz ; les harmoniques de courant mesurés sont liés aux imperfections de la source, non parfaitement sinusoïdale, et à l'autotransformateur.

En revanche, on peut noter un très fort taux de distorsion du courant pour la lampe fluo-compacte, en outre la présence d'harmoniques de rang 3 (87% du fondamental !) constituerait un fort courant ...

	P (W)	I (mA)	Fp	THDi (%)	I1 (mA)	I3 (%)	I5 (%)	I7 (%)	I9 (%)	I11 (%)
Halogène	55,8	243	0,999	1,7	242	0,8	1,1	0,8	0	0,3
Fluo-compacte	15,86	124	0,527	141	67,2	87	65,8	46,6	31,8	24
LED	10,23	50,8	0,857	50,2	45,3	25,5	15,5	31,8	15	9,8

Tableau 3 – Mesures électriques (U = 230 volts) –

...homopolaire pour le réseau ERDF dans le cas d'une généralisation de l'usage de ces lampes en secteur résidentiel.

Pour le modèle « Lumidas » le facteur de puissance est correct (Fp ≈ 0,86) mais la valeur élevée du taux de distorsion (50%) suggère une amélioration possible de l'étage d'entrée.

4.3. Analyse des relevés oscillographiques

Les relevés oscillographiques confirment ce qui a été dit précédemment, on notera l'allure très particulière du courant pour la lampe LED et surtout celui du modèle fluo-compacte.

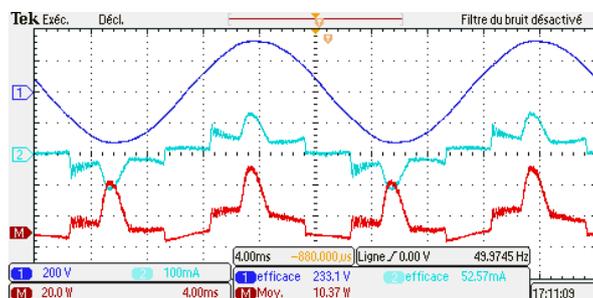


Figure 10 - Lampe LED -

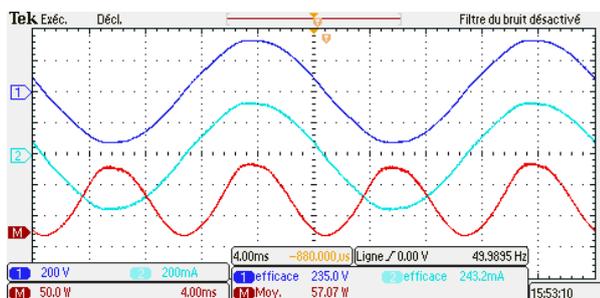


Figure 8 - Lampe incandescence
(voie1 : u – voie 2 : i – voie M : p)

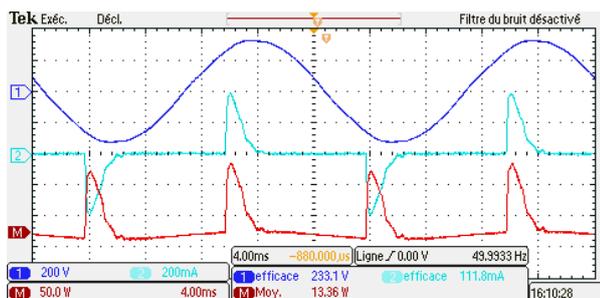


Figure 9 - Lampe Fluo-compacte –

4.4. Influence des variations de tension

Pour une tension variant de 218 à 242 volts, on relève la puissance consommée par chaque lampe ainsi que le flux lumineux à la verticale passant par l'axe optique. On voit ici très nettement la grande sensibilité d'une lampe à filament aux variations de tension, une température plus élevée améliore l'efficacité lumineuse mais au détriment de sa durée de vie ($DV \approx DV_n \cdot [U_n/U]^{13}$ d'après [6]).

La lampe à LED, munie d'une régulation de courant, est quasiment insensible aux variations de tension, pour autant qu'elles restent dans les limites prévues par le constructeur (de 200 à 240 volts). C'est évidemment un net progrès par rapport aux anciennes technologies.

	$\Delta U/U$	$\Delta P/P$	$\Delta \Phi/\Phi$
Halogène	10,4%	16,3%	34,5 %
Fluo-compacte	10,4%	9%	6,1%
LED	10,4%	1,5%	< 0,4%

Tableau 4 -Influence des variations de tension-

4.5. Analyse des mesures thermiques

On voit ici très nettement un autre avantage de la technologie LED, les températures de surface ne sont pas dangereuses, inférieures à 60°C. Il n'y a donc aucun risque de brûlure ; en réalité ceci est un effet indirect du « management thermique » des LED, un aspect fondamental si on veut garantir une durée de vie satisfaisante (au moins 30 000h dans notre cas).

	θculot	θbulbe
Halogène	92°C	94°C
Fluocompacte	83,4°C	61,5°C
LED	42,8°C	28°C

Tableau 5 - Mesures des températures (régime permanent)-

5. Synthèse comparative

En guise d'exploitation des résultats, il est demandé de compléter un diagramme en « toile d'araignée » sur une échelle de 1 à 5 (1 : performance médiocre ; 5 : excellente). On retiendra les critères suivants :

- *cout d'achat*
- *cout final*
- *efficacité lumineuse*
- *qualité de la lumière (TC, IRC...)*
- *nocivité pour l'environnement*
- *sécurité d'emploi*
- *facteur de puissance*
- *taux d'harmoniques*
- *insensibilité aux variations de tension*

On attend bien sur des étudiants qu'ils mettent en avant les qualités de la technologie LED malgré les quelques inconvénients relevés précédemment.

6. Conclusions et perspectives

Pour un faible investissement (moins de 150 € hors matériel de mesure), ce thème extrêmement riche permet de conforter les connaissances scientifiques de nos étudiants tout en les initiant à la découverte de la technologie. A cet égard il n'est pas inutile de leur montrer que si l'usage perdure, la technologie change, tout produit commercial issu de la technologie est par nature daté, le thème de l'éclairage en est une parfaite illustration.

On peut bien entendu proposer des activités complémentaires à celles qui ont été décrites. En particulier à partir de cette année nous introduisons, en fin d'unité, un avant-projet qui s'appuiera sur une carte d'évaluation construite autour d'un circuit dédié à l'alimentation des LED (L6902D de chez ST Microelectronics).



Figure 11 - Carte d'évaluation STEVAL - [5]

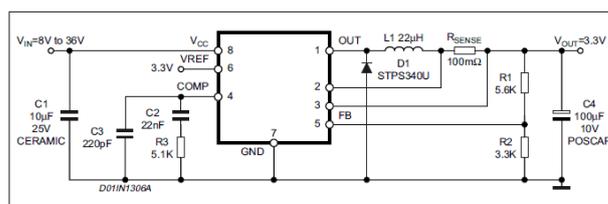


Figure 12 – Schéma de test du L6902 –

Bibliographie

- [1] **ZISSIS Georges** « Eclairage – Photométrie – Colorimétrie » : <http://www.clubeea.org/documents/mediatheque/Eclairage.ppt>
- [2] **Site du fabricant Fawoo** : http://lumidas.jp/light_en/product/lumidas.asp?code=1023
- [3] **Catalogue LED Nichia** : http://www.nichia.com/en/product/led_catalogue.html
- [4] **Documentation lampe fluo-compacte Philips** : http://download.p4c.philips.com/14b/9/929753131452_eu/929753131452_eu_pss_fra.pdf
- [5] <http://fr.farnell.com>
- [6] Lampes à incandescence – Marc La Toison – Techniques de l'Ingénieur – D 5805

LumiDas-B Bulb Type Indoor Lamps

6W

10W



E26 / E27

BL06-100/120VE26S(W)
BL06-100/120VE26S(P)
BL06-200/240VE27S(W)
BL06-200/240VE27S(P)



GU10

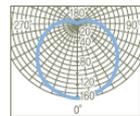
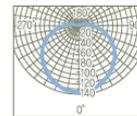
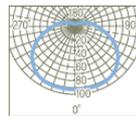
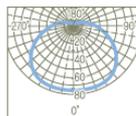
BL06-100/120VGU10S(W)
BL06-100/120VGU10S(P)
BL06-200/240VGU10S(W)
BL06-200/240VGU10S(P)



E26 / E27

BL10-100/120VE26S(W)
BL10-100/120VE26S(P)
BL10-200/240VE27S(W)
BL10-200/240VE27S(P)

Power Consumption (W/h)	6	6	10	10
Luminous Efficacy (lm/W)	68.5	82.8	65.5	82.1
CRI(Ra)	82.5	73.1	82.5	73.1
Base	E26 / E27 / GU10	E26 / E27 / GU10	E26 / E27	E26 / E27
Size (mm)	Ø63 X H 109.5	Ø63 X H 109.5	Ø80 X H 130	Ø80 X H 130
Weight (g)	120	120	270	270
Power Factor (PF)	> 0.9	> 0.9	> 0.9	> 0.9
Lifetime (hours)	30,000~50,000	30,000~50,000	30,000~50,000	30,000~50,000
Color Temperature	Warm White	Pure White	Warm White	Pure White
Operating Ambient Temperature	5°C ~ 35°C	5°C ~ 35°C	5°C ~ 35°C	5°C ~ 35°C
Input Voltage (V)	AC 100-120V / AC 200-240V, 50/60Hz	AC 100-120V / AC 200-240V, 50/60Hz	AC 100-120V / AC 200-240V, 50/60Hz	AC 100-120V / AC 200-240V, 50/60Hz
Certification	UL, CE (pending)	UL, CE (pending)	UL, CE (pending)	UL, CE (pending)



※ To improve lamp quality, changes and updates in specification may be made without prior notice.

Figure 13 - Extrait des caractéristiques de la série Lumidas (d'après une documentation Fawoo) -



Softone ESaver 6Y

Softone ESaver 16W WW E27 230-240V T60 1PF

Lampes décoratives à économie d'énergie couvertes pour des utilisations professionnelles

Données du produit

• Caractéristiques Générales

Culot	E27
Forme de la lampe	T60 [T 60mm]
Durée de vie lampe moyenne	10000 hr
Durée de vie 50% de mortalité	10000 hr
Rated Lifetime (hours)	10000 hr
Rated Lifetime (years)	10 an

• Caractéristiques techn. de lumière

Code couleur	827 [CCT of 2700K]
Indice de rendu des couleurs	82 Ra8
Désignation teinte	Blanc chaud
Température de couleur	2700 K
Température de couleur techn.	2700 K
Coordonnée chromatique X	464 -
Coordonnée chromatique Y	419 -
Flux lumineux lampe	870 Lm
Efficacité lumineuse lampe	54.4 Lm/W
Maintien du flux à 2000 h	85 %
Maintien du flux à 5000 h	77 %
Rated Luminous Flux	870 Lm

• Caractéristiques électriques

Puissance lampe	16 W
Facteur de puissance	0.57 -
Tension	230-240 V
Intensité	0.120 A
Intensité mA	120 mA
Fréquence nominale	50/60 Hz
Gradable	Non
Wattage Equivalent	70 W
Rated Wattage	16 W
Starting Time	1.0 (max) s
60% du flux au bout de	10 (nom), 60 (max) s

• Caractéristiques environnementales

Label d'efficacité énergétique	A
Contient du mercure	1.42 (nom), 1.58 (max) mg

• Conditions de mesure

Cycle Allumage / Extinction	50000X
-----------------------------	--------

• Dimensions en mm.

Longueur totale C	114.0 (max) mm
Diamètre ampoule D	60.8 (max) mm
Largeur totale E	60.8 (max) mm
Largeur F	46.5 (max) mm
Overall Height H	114.0 (max) mm

• Données produit

Code commercial	662583 10
Code produit EOC	87115006258310

PHILIPS
sense and simplicity

Figure 14 - Extrait des caractéristiques de la série Softone (d'après une documentation Philips) -

Ballast électronique pour éclairage par tube fluorescent

Equipe pédagogique, département EEA, ENS CACHAN

hoang@satie.ens-cachan.fr, feld@eea.ens-cachan.fr

Résumé : Nous reproduisons dans cet article, une partie du texte de TP que les étudiants font au deuxième semestre de l'année de préparation à l'agrégation externe de génie électrique

1 Présentation

Les lampes électriques peuvent être classées en deux familles :

- les lampes à incandescence
- les lampes à décharge (gaz : sodium ou mercure)

Parmi ces dernières, les tubes fluorescents utilisent le mercure à basse pression.

Contrairement aux lampes à incandescence, les tubes fluorescents ne peuvent être directement connectés à la source d'énergie. Pour cela, nous utilisons soit :

- un ballast électromagnétique
- un ballast électronique

Nous reproduisons dans cet article, une partie du texte de TP que les étudiants font au deuxième semestre de l'année de préparation à l'agrégation externe de génie électrique

L'objectif de cette séance de TP est d'étudier le montage du ballast électronique utilisé pour les tubes fluorescents dont le schéma est donné à la figure 1 ci-dessous :

2 Ballast électronique

On ne s'intéressera, dans cette partie, qu'à la partie onduleur du ballast électronique (voir Figure 2)

Le ballast électronique permet :

1. d'améliorer l'efficacité lumineuse
2. de diminuer le bruit dû à la vibration de l'inductance
3. d'éliminer le scintillement
4. d'augmenter la durée de vie du tube (non vérifiable en TP)
5. de moduler le niveau d'éclairage

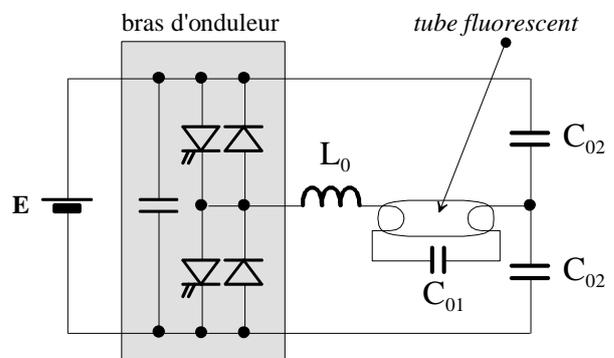


Figure 2

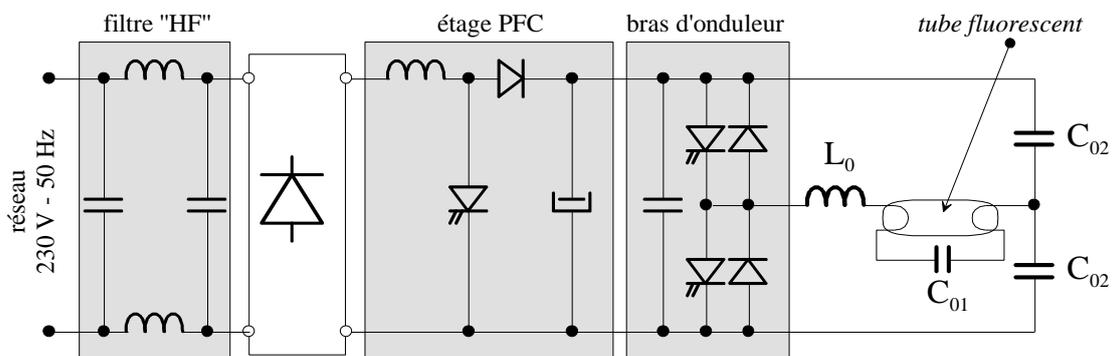


Figure 1

PREPARATION

Les interrupteurs KH et KB de l'onduleur de tension (voir figure 3) sont commandés à une fréquence $f = 1/T$. La source de tension est considérée comme idéale.

KH fermé de 0 à αT avec $\alpha \in [0,1]$
 KB fermé de αT à T

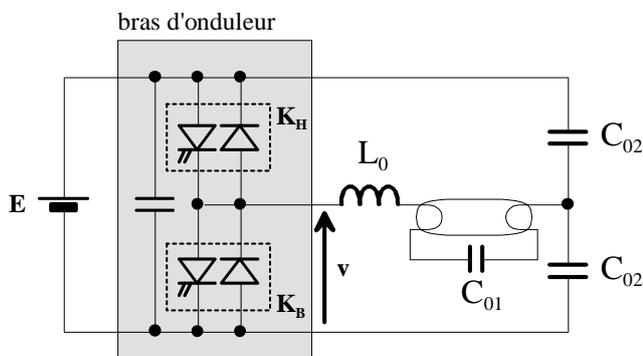


Figure 3

- Le tube fluorescent non amorcé présente une impédance de plusieurs $k\Omega$. On la note R_{OFF} .
- Le tube fluorescent amorcé présente une impédance de quelques Ohm. On la note R_{ON} .
- Les électrodes ont une impédance de quelques Ohm : on prendra $r = 10 \Omega$.
- La valeur de C_{01} est telle que $C_{01} < 0,1 C_{02}$.

2.1 Montrer que l'on peut se ramener au schéma d'étude présenté à la figure 4.

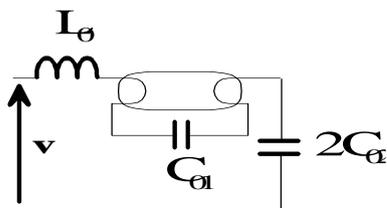


Figure 4

La tension "v" peut être décomposée en une somme d'une tension constante et d'une tension alternative à valeur moyenne nulle.

2.2 Tracer ces deux grandeurs et préciser leurs caractéristiques.

2.3 Le tube fluorescent étant non amorcé, tracer le graphe indiquant l'amplitude du courant parcourant les électrodes en fonction de la fréquence de commande des interrupteurs. On fera l'étude en ne considérant que la composante fondamentale du courant (méthode du premier harmonique),.

$$E = 350 \text{ V} ; \alpha = 0,5 ; f \in [10 \text{ kHz}; 100 \text{ kHz}]$$

$$L_0 = 1,5 \text{ mH} ; C_{01} = 6,8 \text{ nF} ; C_{02} = 100 \text{ nF} \text{ et } R_{OFF} = \infty$$

2.4 Le tube fluorescent étant non amorcé, tracer le graphe indiquant l'amplitude de la tension aux bornes des électrodes en fonction de la fréquence de commande des interrupteurs. On fera l'étude en ne considérant que la composante fondamentale (méthode du premier harmonique).

2.5 Le tube fluorescent étant amorcé, tracer le graphe indiquant l'amplitude du courant parcourant les électrodes en fonction de la fréquence de commande des interrupteurs, celui indiquant l'amplitude de la tension aux bornes des électrodes en fonction de la fréquence de commande des interrupteurs et celui indiquant la puissance consommée par le tube.

$$AN : R_{ON} = 400 \Omega$$

MANIPULATION

2.6 A partir des courbes déterminées précédemment indiquer comment évolue le point de fonctionnement.

2.7 Donner des éléments de dimensionnement sachant que la fréquence de travail doit être supérieure à 45 kHz afin de ne pas perturber les appareils de transmission infra rouge et que le courant dans le tube doit être inférieur à 400 mA (tube 18 W).

2.8 Réaliser le montage et vérifier le fonctionnement à l'aide des relevés du courant parcourant les électrodes, du courant absorbé par le tube et de la tension aux bornes du tube.

2.9 Mesurer l'efficacité lumineuse.

3. Bibliographie

- Sujet du capet interne de génie électrique 2001 : projet d'éclairage.
- Sources de lumière de l'éclairage électrique. Généralités. Marc La Toison, Techniques de l'Ingénieur, traité D 5800.
- Sources de lumière de l'éclairage électrique. Lampes à décharge. Marc La Toison, Techniques de l'Ingénieur, traité D 5810.
- Revue 3EI n°19 et n°24.
- Documentation International Rectifier : <http://www.irf.com>
- Documentation Philips: <http://www.lighting.philips.com>

Organisation de chantier : Equipement en réseau des salles BTS Electrotechnique

Eric BRUNEAU

eric.bruneau@ac-creteil.fr

Lycée Gaston BACHELARD 32 avenue de l'Europe 75500 CHELLES

Résumé : Le présent article décrit à partir des prescriptions de la région Ile de France, des dossiers fournis aux élèves, l'organisation matérielle, le ressenti des étudiants pilotes et ouvriers, celui de l'administration en qualité de maître d'ouvrage, de gestionnaire pour une réalisation correspondant à cette épreuve.

1. Préambule. :

Depuis 3 années, l'épreuve de chantier permet aux étudiants du lycée, à partir d'exemples réels, de se mettre en situation d'organisation, de gestion et de réception d'un ouvrage interne à l'établissement.

Les réalisations ont été :

En 2009 :

- Equipement d'une rampe de projecteurs pour la section cinéma (Technique «cache/contre-cache» sur des murs inactiniques)



Mise aux normes de la machine de transfert de la section IRIS



En 2010 :

- Equipement d'une rampe de projecteurs pour la scène de la section musique.



- Equipement d'un réseau informatique pédagogique pour la section IRIS comprenant une armoire de brassage ayant 12 switches, 12 répartiteurs et 32 prises murales.



En 2011 :

- Equipement en courant faible de la salle de musique.
- Equipement multimédia avec une caméra IP pédagogique pour la section IRIS. Equipement des deux salles d'électrotechnique en réseau.

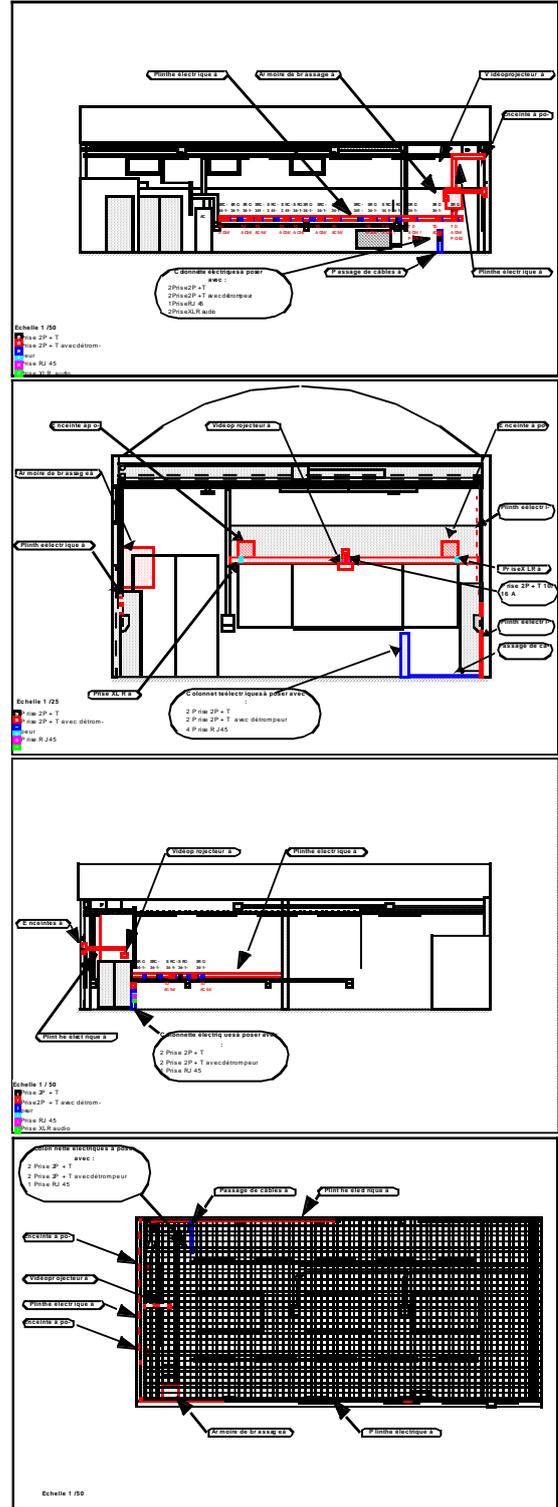
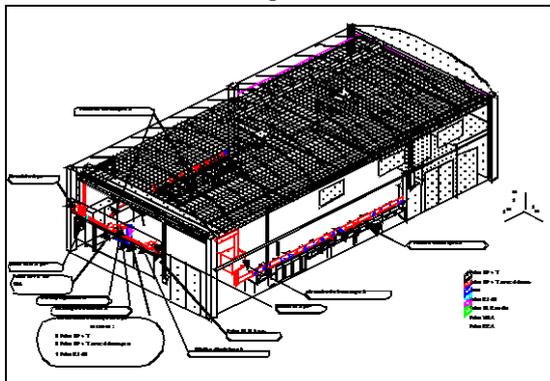


Cette année à cause des intempéries, il a fallu improviser le jour d'une réalisation pour le bon déroulement de l'épreuve.

2. Dossier technique.

Le dossier technique fourni aux étudiants comprend :

- le CCAP modifié correspondant aux travaux réalisés par la région dans le lycée.
- Les préconisations de la région en matière de câblage réseau (Document ET1)
- le plan de masse, les plans à l'échelle des zones de travail, un plan isométrique permettant une vision 3D avec l'implantation des matériels.



- Un fichier EXCEL permettant d'établir les fiches de travaux ouvriers comprenant les tâches à accomplir (horaires, habilitation), le matériel et l'outillage collectif et individuel nécessaires.

3. Apport de cette épreuve aux différents acteurs.

3.1 Témoignages des élèves passant l'épreuve.

Adriano d'ASCANIO étudiant en STS 2^{ème} année

« Le jour prévu pour la réalisation du chantier, des intempéries ont eu lieu empêchant les élèves de la classe de venir en cours. Les fortes chutes de neige nous avaient donc contraints à réaliser le chantier d'une façon inattendue. Nous les quatre étudiants en situation d'évaluation, nous sommes donc retrouvés sans ouvrier, et il a fallu improviser.

Etant le premier à être évalué, j'ai dû m'adapter et gérer des élèves appartenant à la classe de BTS électrotechnique 1^{ère} année.

Cette situation a été très intéressante mais aussi très stressante, car ne les connaissant pas et eux ne connaissant pas le chantier.

Il a fallu que je leur explique le chantier ainsi que les tâches qu'ils devaient accomplir.

J'ai pu me rendre compte que de gérer les aléas d'un chantier n'est une affaire simple, surtout que les élèves « ouvriers » arrivaient au fur et à mesure pendant le déroulement du chantier, les professeurs ayant jugé opportun de les inviter.

L'afflux de cette manœuvre non prévue au planning m'a mis, à certains instants, en difficulté pour la gérer.

A la fin de ma période d'évaluation, le planning avait pris un peu de retard sans que cela n'ait eu de réelle influence pour le bon déroulement de la réalisation.

Cette expérience a été très enrichissante, malgré une situation difficile qui aurait pu être néfaste pour notre évaluation. Nous l'avons pris comme un défi à relever et a rendu le chantier beaucoup plus réaliste.

Par la suite, nous avons eu un très bon retour de notre investissement. Il a été valorisé par l'acceptation de la réalisation par la région. »

Sébastien GIBELIN étudiant en STS 2^{ème} année

« Le chantier que nous avons dû réaliser a été la réhabilitation du réseau informatique d'une de nos salles de cours. Cette idée de réaménager nos salles lors de notre chantier d'évaluation nous a tout de suite plu. Nous allions pouvoir réaliser quelque chose de très intéressant. Ce réaménagement allait nous servir ensuite tous les jours. Après quelques semaines d'organisation dans notre travail et une très grosse préparation technique de la part de nos professeurs, nous allions enfin pouvoir réaliser notre équipement en ayant comme ouvrier nos camarades de classe.

Le jour arrivé, tout ne s'est pas passé comme nous l'avions prévu. Bien qu'ayant préparé notre chantier dans le temps imparti, un problème n'avait pas été prévu : celui de la météo. Cette épreuve de BTS, nous ne

pouvions pas la retarder parce que nos professeurs devaient rendre les notes quelques jours plus tard. Sans cette note nous ne pourrions valider notre examen. On s'est débrouillés pour venir, mais une fois sur place peu d'ouvriers avaient réussi à vaincre les intempéries et la réalisation était compromise. Pour ne pas prendre de retard, le peu d'ouvriers présents ont commencé le chantier. Notre professeur savait qu'avec un nombre réduit d'exécutants, le chantier serait difficilement réalisable dans les temps impartis. Celui-ci nous a rendu un grand service en réquisitionnant nos camarades de première année présents en nombre restreint. Ce renfort, nous a permis d'exécuter notre chantier pendant toute la journée. Malgré les difficultés rencontrées pour le déroulement de cette épreuve, cela nous a beaucoup plu. Cette situation nous a permis, l'histoire d'un moment, de nous mettre dans la peau du « chef de chantier », de nous rendre compte que des impondérables peuvent survenir et que beaucoup de responsabilités nous incombent. C'est avec ce genre d'expérience réalisée en cours que nous pourrions dans le futur anticiper les problèmes non prévus, s'organiser différemment, mais aussi tout simplement ne pas arriver sans aucuns acquis sur le marché du travail. »

Fabien TELLIEZ étudiant en STS 2^{ème} année

« Le chantier consistait à réhabiliter les installations électriques des salles BTS électrotechnique pour sécuriser l'alimentation des postes informatiques (pontage de multiprises en multiprises pour alimenter les différents postes).

Au programme il y avait l'installation de nouvelles goulottes le long des murs de la salle avec des prises électriques et des prises RJ45 desservant chaque poste informatique, l'installation d'une colonne électrique au milieu de la salle pour le « poste professeur », ainsi que l'installation de deux enceintes et d'un vidéo projecteur monté sur un bras.

Ce chantier, bien qu'il soit obligatoire pour notre BTS, fût une expérience très enrichissante pour nous. Il nous a permis de voir de quelle façon on le réalise : de la préparation avec les différentes mesures à faire (câbles, goulottes, perçages) ou encore l'administratif (ordre de travail, plans, autorisation, etc.), à la gestion de la réalisation.

Le jour du chantier, un problème rapidement mis en évidence remet en cause tout ce travail de préparation, toute cette organisation minutieuse du planning : la neige. De très nombreux ouvriers, qui nous devaient nous être confiés, se sont retrouvés dans l'incapacité de se rendre au lycée. Notre professeur a réussi à trouver de nouveaux « exécutants » (nous remercions les étudiants de première année pour avoir acceptés de venir nous

aider). Cette situation, bien que périlleuse, nous a permis d'apprendre qu'un chantier peut se dérouler différemment de ce qui était prévu et qu'il faut alors être réactif pour assurer les délais. Cette solution de secours nous apporta également une nouvelle expérience : savoir gérer une équipe d'ouvriers qui ne connaît rien à ce qui doit être fait et comment cela doit être fait.

Bien que nous ayons fourni tous les efforts que nous pouvions afin de terminer le chantier dans les délais, des problèmes de câblages (prises RJ45 réalisés par les étudiants de première année) nous ont obligés à revenir le lendemain pour y remédier et finaliser le chantier avant la réception par le Chef des Travaux : c'est le seul point négatif de cette expérience.

En conclusion, cette épreuve nous a apporté une grande expérience pratique et théorique dans le cadre de notre formation. Elle nous permettra, dans le futur, de gérer à nouveau ce genre de situation en ayant cette fois-ci un recul et quelques notions déjà acquises.

Jonathan DIAS étudiant en STS 2^{ème} année

« Cette épreuve a été une expérience enrichissante car nous avons rencontré des problèmes qui peuvent survenir sur des vrais chantiers en entreprise. Le problème majeur fut le manque d'ouvriers qui a été résolu par leur recrutement dans des classes d'électrotechnique présentes dans le lycée. J'ai trouvé intéressant de pouvoir résoudre ce genre de problème.

Le point positif de la réalisation de cet équipement est que j'ai vu comment se déroule un chantier du début jusqu'à sa fin.

Le point négatif est qu'à cause du manque d'expérience des ouvriers recrutés, on n'a pas pu respecter les temps. Les câblages des prises RJ45 ont du être refaits le lendemain par nous-mêmes. »

3.2 Témoignage des élèves « ouvriers »

Christophe REDON étudiant en STS 1^{ère} année

« Suite aux événements neigeux de décembre, peu de cours ont pu être assurés ce jour là.

J'ai donc eu l'opportunité en tant qu'élève de première année de BTS électrotechnique, d'assister et surtout de participer en l'espace d'une journée à une épreuve du BTS : l'organisation de chantier.

Dès mon arrivée, le chantier était déjà bien commencé. L'élève désigné comme « chef habilité B2 » à ce moment là s'est occupé de moi en me mettant rapidement en situation. Il me confia une tâche à effectuer en prenant garde, bien entendu, que mes équipements de protections individuels étaient portés correctement.

Le travail consistait principalement à câbler et sertir des prises RJ45 en suivant avec attention le schéma de câblage. Un élève me précisa la nature du type de raccordement correspondant, savoir si le câblage était de type EIA/TIA 568 A ou EIA/TIA 568 B.

Cette période m'a permis d'acquérir la maîtrise des différents outils mis à ma disposition et de travailler plus efficacement par la suite.

Cette expérience a été très enrichissante car j'ai pu observer dans un premier temps le travail en équipe, la répartition des tâches, le rôle à jouer de chacun, et surtout l'importance des responsabilités que doit tenir le chef de chantier durant toute la période des opérations, le tout dans la bonne entente et la solidarité.

C'est donc avec des sentiments positifs que je repars de cette expérience avec une idée beaucoup plus claire de ce qui m'attendra l'année prochaine. Cela qui m'a permis également de faire plus ample connaissance avec les élèves de deuxième année, à qui je leur souhaite d'ailleurs une très bonne réussite à l'examen. »

Gaël FOURTIER, Tony LANCHAS MONTEIRO

étudiants en STS 1^{ère} année

« Nous n'étions pas préparés à participer au chantier. Nous y avons été conviés et avons pu voir ce que nous réservent ceux-ci de l'année prochaine.

Pour notre part, cette journée s'est bien passé : une ambiance sympathique mais travailleuse, différente des cours habituels.

Le fait que les élèves de première année n'ayant pas eu de cours sur les tâches élémentaires à effectuer (câblage des prises RJ45 etc.) a permis aux élèves de terminale de montrer comment le faire. Effectuer un chantier avec toute une préparation au préalable ne peut-être que bénéfique pour les élèves.

Cela nous permet de voir quelles sont les attentes de la vie professionnelle. Cette épreuve est un moyen de faire notre auto-évaluation, le bilan de nos compétences actuelles et, de nous projeter après l'obtention de ce diplôme, dans la vie active.

En conclusion, je pense que ces chantiers sont positifs pour les élèves. Ils sont bénéfiques à toute la communauté.

Chaque acteur y trouve son avantage : des élèves motivés qui s'y investissent en réalisant des équipements qui les intéressent, des professeurs qui voient leurs projets aboutir, et l'établissement qui gagne en équipements. »

3.3 Témoignage des administratifs du lycée.

Gérard JAMIN, chef des travaux

« Il a été demandé aux étudiants de la section BTS Electrotechnique de réaliser le câblage pour la mise en réseau de leurs salles de cours dans le cadre de leur épreuve de chantier.

Cette décision a été prise pour que cette épreuve de chantier se rapproche au mieux de la réalité industrielle et que ce soit pour eux valorisant en laissant une trace de leur travail dans le lycée.

L'effet sur les étudiants a très largement dépassé nos espérances.

L'investissement et le sérieux qu'ils ont montrés dans leur démarche de chantier ont été remarquables. L'ampleur du chantier dépassait largement ce qu'ils pouvaient faire dans le temps qui leur était imparti. Les étudiants n'ont pas hésité à reprendre le lendemain pour finaliser leur chantier. Le travail qu'ils ont effectué a été réalisé dans les règles de l'art sans jamais négliger la qualité.

A l'issue du chantier, les étudiants étaient fiers et à juste titre du travail qu'ils ont réalisé. »

Marc MAGAUD, proviseur

« L'usage des Nouvelles Technologies de l'Information et de Communication est incontournable dans les établissements scolaires et il est de notre rôle de permettre aux élèves et aux étudiants de bénéficier de structures d'accueil et d'apprentissage innovants.

Le lycée Gaston Bachelard, avec l'aide du Conseil Régional d'Ile de France, s'équipe depuis plusieurs années en matériel informatique mais des aménagements en interne sont nécessaires pour faciliter le travail des enseignants au quotidien.

C'est dans cette logique d'aménagement des espaces de travail que Monsieur BRUNEAU, enseignant en BTS électrotechnique, place depuis plusieurs années ses étudiants dans des situations réelles de chantiers.

Depuis l'année scolaire 2008/2009, les étudiants ont réalisé une dizaine de chantiers parmi lesquels la mise en service de deux rampes d'éclairage pour des enseignements de musique et de cinéma, le câblage en réseau de plusieurs salles de cours ou la pose d'une baie de brassage et de matériel de projection.

Cette stratégie de mise en situation réelle d'apprentissage est intéressante à plusieurs niveaux pour l'établissement :

Elle nous permet d'utiliser les ressources internes du lycée pour des aménagements dont nous avons besoin au quotidien sans produire de dépenses excessives.

Elle génère une motivation supplémentaire pour les étudiants impliqués dans l'amélioration de leurs propres conditions d'apprentissage. Lors d'une visite de chantier

(câblage et mise en réseau d'une salle de cours), j'ai pu constater le sérieux, la réflexion sur l'organisation du travail et le respect des consignes de sécurité ainsi que de véritables compétences professionnelles développées par nos étudiants. »

4. Références régionales pour le câblage multimédia des lycées d'Ile-de-France (Extraits).

ETI - Exigences techniques de câblage multimédia pour les lycées de la région Ile-de-France.

Le document définit les règles générales applicables pour le câblage multimédia des lycées de la Région Ile-de-France, le câblage multimédia faisant partie intégrante du programme d'intervention (construction, rénovation...).

Il est constitué de trois parties, formant un ensemble cohérent.

- Partie 1 (32 pages) : éléments de programmation et niveau d'équipement, (Programme générique optimal en phase de programmation du projet).

- Partie 2 (54 pages) : architecture technique et mise en œuvre, (En phase de réalisation destinée pour le maître d'œuvre).

- Partie 3 (38 pages) : recommandations pour la distribution électrique associée, (Préconisations en phase de réalisation destinée pour le maître d'œuvre).

4.1 Partie I : Éléments de programmation et niveau d'équipement

4.1.1. Principes généraux

L'action régionale se développe selon trois axes complémentaires :

o équiper les lycées d'ordinateurs performants et en nombre suffisant,

o promouvoir la création de réseaux au sein des établissements, notamment grâce au câblage multimédia des lycées,

o permettre aux lycées de communiquer entre eux, avec les entreprises et d'accéder à 'Internet.

La mise en œuvre de ces réseaux informatiques a notamment pour objectifs de :

- offrir aux enseignements technologiques et professionnels des outils informatiques en phase avec les référentiels des diplômes et des programmes
- permettre l'utilisation de moyens pédagogiques informatiques et multimédias dans les enseignements général et spécialisé,
- faciliter la communication dans les établissements, notamment dans le secteur de la vie scolaire,
- servir de support à une large diffusion des nouvelles technologies de l'information et de la communication, notamment Internet, dans les établissements.

Pour être réellement utilisable, ce câblage multimédia doit posséder trois qualités essentielles :

- **la systématisation** : tout l'établissement doit être desservi par le câblage multimédia
- **l'intégration** : la possibilité de transmettre sur un même type de câble de la voix, des données et des images,
- **l'adaptabilité**, c'est-à-dire la facilité de modification de l'usage d'un câble ou de la structure du réseau,

Une distribution électrique spécifique doit être associée au câblage multimédia. Cette distribution doit être séparée de la distribution générale en tête de l'installation.

Chaque prise RJ45 est associée à une ou plusieurs prises électriques.

DENOMINATION	COURANTS FAIBLES	Prise RJ45	PC 10/16A+T « Détrompée »	PC 10/16A+T « Normale »
PATq	prise RJ45 « technique »	1	1	0
PAT	prise RJ45 à usage téléphonique	1	1	0
PAI	prise RJ45 à usage informatique	1	3	0
PAX1	prise RJ45 à usage informatique EXAO (salle de TP de sciences expérimentales)	1	3	3
PAX2	Mesures physiques : 2 prises RJ45 à usage informatique EXAO (salle de TP de sciences expérimentales)	2	3	3
PA2	2 prises RJ45 à usage initial : téléphonique + informatique	2	4	0

De façon générale, toute salle d'enseignement devra être équipée au minimum d'un PA2 pour le professeur, à proximité du tableau.

4.1.2. Secteur pédagogique : Enseignement industriel

L'évolution des référentiels des formations de Sciences et Technologies Industrielles (S.T.I.) montre que l'on s'oriente vers une utilisation de plus en plus importante de l'informatique dans les sections industrielles (modélisation, CAO, DAO, CFAO, Productique...).

4.1.3. Tableau Récapitulatif des Points d'Accès par secteur

1E - ENSEIGNEMENT DE LA PRODUCTION	Qté	Type	Remarques
3.a Pôle Industriel commun			
Salle de CAO-DAO (laboratoire de construction) pour les sections professionnelles	12	PAI	Proche du professeur Schéma d'implantation à réaliser
Bureau du chef de travaux	1	PAI	Pour une imprimante réseau
	1	PA2	Par poste de travail (2 postes de travail en généra)
	1	PAI	Pour une imprimante réseau
3.b Pôle science de l'ingénieur			
Laboratoire ISI/ISP et SSI	1	PA2	Proche du professeur
	1	PAI	Proche du professeur
	15	PAX2	Schéma d'implantation à réaliser (selon les salles 15 PAX2)
	1	PAI	Pour une imprimante réseau
Salle de préparation du laboratoire ISI et SSI	2	PA2	
3.c Autres locaux industriels			
Salle de projet des BTS toutes spécialités	1	PA2	Proche du professeur
	1	PAI	Proche du professeur
	15	PAX2	Schéma d'implantation à réaliser
	1	PAI	Pour une imprimante réseau
Laboratoire de sciences industrielles des baccalauréats "sciences et technologie de l'ingénieur". Toutes spécialités	1	PA2	Proche du professeur
	1	PAI	Proche du professeur
	15	PAX2	Schéma d'implantation à réaliser
	1	PAI	Pour une imprimante réseau

4.1.4. Autres solutions de mise en réseau

Les autres solutions de mise en réseau informatique actuellement disponibles, et particulièrement les solutions WIFI et CPL sont autorisées pour des applications ponctuelles,

Elles sont intéressantes pour résoudre provisoirement des problèmes de connexion, mais restent à ce jour difficilement généralisables sur des établissements complets pour des raisons de rapport performances /coût toujours en faveur du cuivre, de leur sécurisation difficile et onéreuse (surtout pour le WIFI), de la perte de la banalisation (prise en charge de la téléphonie et de la vidéo non résolus à ce jour).

4.2 Partie II Architecture technique et mise en œuvre

4.2.1. Introduction

La réalisation d'un câblage multimédia dans un établissement représente un certain investissement dont la pérennité doit être assurée. Pour ce faire, ce câblage doit être **banalisé** au maximum afin de ne pas être remis en cause avec l'évolution du parc informatique.

Afin d'obtenir une souplesse optimale d'utilisation, ce doit être un **pré-câblage** le plus **systématique** possible et qui doit permettre toutes les configurations et reconfigurations souhaitables pour un coût acceptable.

4.2.2. Normes et règlements

Les installations seront exécutées suivant les règles de l'art, avec du matériel de qualité reconnue.

Les normes et règlements à inclure sont les suivants :

- Les prescriptions du présent document,
- Tous les décrets, arrêtés, règlements et normes concernant les systèmes de câblage qui seront en vigueur à la date de la soumission,
- Les règlements UTE en général,
- La norme NFC 15.100 et additifs, fixant les conditions d'exécution des installations électriques de première catégorie,
- Les DTU (prescriptions de mise en œuvre),
- Les normes internationales et leurs équivalences françaises et européennes définissant l'architecture et les composants des réseaux structurés et notamment les normes ISO 11801 (2ème édition de septembre 2002), EN 50173, EN 50174, EN 50167, EN 50168, EN 50169, EN 50288, EN 50289, EN 50290 et ANSI/EIA/TIA-568-B.2.
- Les normalisations techniques portant sur les différents protocoles informatiques existants à ce jour, notamment les protocoles 10 Base T, 100 Base T, ATM155 et 1000 Base T (gigabit Ethernet) et 10 gigabit Ethernet.

Nota : Toute nouvelle publication des normes ISO 11801 et EN 50173 entraînera son application.

4.2.3. Documentation à fournir par le bureau d'études

Le dossier de consultation des entreprises (DCE) élaboré par le maître d'œuvre sera constitué au minimum des éléments suivants :

- le présent document,
- un tableau récapitulatif des prises VDI par local,
- un schéma de l'architecture du câblage avec dimensionnement des rocades,
- des plans de principe d'aménagement des locaux de brassage,
- des plans de principe de cheminements,
- des schémas de principe d'organisation des répartiteurs,
- un bordereau de prix **détaillé**

4.3. Architecture du câblage

4.3.1. Organisation générale

Le pré-câblage est organisé en étoiles autour de sous-répartiteurs (ou locaux de brassage).

Les étoiles sont composées d'un ensemble de câbles 4 paires ou 2x4 paires reliant les points, d'accès locaux au sous-répartiteur dont ils dépendent (distribution horizontale). La longueur des branches de l'étoile ne doit pas dépasser **90 mètres**.

4.3.2. Les répartiteurs

Les répartiteurs constituent les postes d'aiguillage du réseau. Ils reçoivent les panneaux RJ45 de connexion aux prises de la zone qu'ils distribuent ainsi que les panneaux RJ45 et tiroirs optiques des différentes rocades de la distribution verticale.

On distinguera deux types de répartiteur :

- Les Répartiteurs Généraux (RG)
- Les Sous Répartiteurs de zone (SR)

Les répartiteurs sont, en règle générale, composés de baies 19" dans lesquelles viennent se fixer des panneaux RJ45.

En partie haute, les baies 19" accueillent les connexions des rocades optiques.

Sous les rocades optiques seront installés les panneaux RJ45 de la distribution verticale informatique (rocades).

En dessous seront mises en place des étagères pour accueillir le matériel actif du réseau informatique puis les panneaux RJ45 de la distribution horizontale.

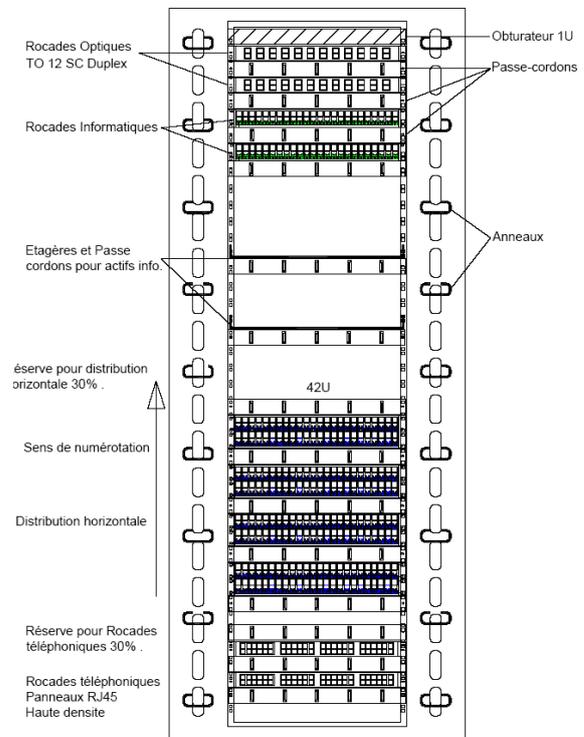
Enfin, en bas de baie seront installés les panneaux RJ45 haute densité de la distribution verticale téléphonique (rocades).

Dans le Répartiteur Général Téléphonique, les modules opérateurs et les modules d'entrées du PABX seront raccordés sur un châssis répartiteur 19" 1 rail horizontal intégré en baie 19".

Les sorties du PABX et les départs de rocade seront câblés sur des panneaux haute densité à ports RJ45. Les modules et panneaux RJ45 sont groupés par blocs et selon leur fonction, une couleur leur est affectée :

- **Bleu** : Distribution Horizontale (Postes de travail)
- **Rouge** : Distribution Horizontale (Autres courants)

Schéma de principe d'équipement d'un répartiteur - Cas 1 Baie



faibles)

- **Jaune** : Ressources Informatiques et téléphoniques
- **Vert** : Rocades

4.3.3. Le Sous Répartiteur de zone (SR)

Le Sous Répartiteur de zone constitue un nœud à partir duquel sont reliés :

- les postes de travail de la zone qu'il distribue,
- les rocades informatique, téléphonique et autres courants faibles provenant des répartiteurs généraux,
- les rocades informatiques provenant des Sous Répartiteurs de zone les plus proches.

Chaque Sous Répartiteur de zone sera composé d'une ou plusieurs baies 19" équipées :

- de panneaux optiques (connecteurs LC ou SC Duplex) pour les rocades informatiques et autres courants faibles optiques vers les autres répartiteurs,
- les panneaux RJ45 pour la connexion des prises de la zone qu'il distribue,
- les équipements actifs de réseau informatique (hors lot),
- les panneaux RJ45 pour la connexion des rocades informatiques cuivre,

- les panneaux RJ45 pour la connexion des rocares téléphoniques.

4.4. Les composants

4.4.1. Les câbles.

- *Paires torsadées*

Les câbles seront **écranés par paire** et d'impédance **100 ohms** (U/FTP, F/FTP, S/FTP).

La gaine des câbles devra impérativement être non propagateur de la flamme et zéro halogène (LSZH).

- *Distribution horizontale*

Ils seront obligatoirement de catégorie 6, écranés par paire et d'impédance caractéristique 100 ohms. Ils auront une capacité de 4 paires ou 2x4 paires.

Ils devront être conformes à la norme 802.3af permettant de transférer du courant électrique en même temps que des données informatiques sur des câbles à paires torsadées.

- *Distribution verticale (rocares)*

Pour l'informatique, les rocares seront composées de câbles 4 paires catégorie 6, écranés par paire et d'impédance caractéristique 100 ohms identiques à ceux utilisés pour la distribution horizontale.

Pour le téléphone, elles auront une capacité de 25 ou 50 paires et seront de catégorie 5 /UTP.

4.4..2. Les cordons de brassage

- *Informatique et autres courants faibles :*

Ce sont des cordons RJ45-RJ45 réalisés avec un câble 4 paires écrané 100 ohms, catégorie 6 générique. Les prises RJ45 seront blindées. Ces cordons devront impérativement provenir du même constructeur que celui du système de câblage pour des questions de performances et de garantie.

Leur longueur sera calculée en fonction de la configuration des différentes baies :

- 1 mètre pour les coffrets,
- 2 mètres pour les baies 19 pouces.

Ils permettront d'établir des connexions entre :

- le matériel actif et les prises terminales,
- le matériel actif et les rocares informatiques,
- les rocares informatiques et les prises terminales.

- *Couleurs :*

Les cordons de brassage devront être fournis en trois couleurs différentes :

- gris (par exemple) pour les cordons de brassage informatique permettant de réaliser le brassage entre la distribution horizontale et les équipements actifs de réseau informatique,
- rouge (ou autre couleur vive) pour les cordons de brassage informatique permettant de réaliser les connexions entre la distribution verticale et les

équipements actifs de réseau informatique, entre 2 équipements actifs LAN ou WAN et pour le brassage des connexions vers les serveurs,

- bleu (par exemple) pour la téléphonie,
- autre pour les courants faibles.

- *Remarque :* les cordons de brassage pour les autres courants faibles devront impérativement être **verrouillables** (dispositif soit sur le cordon, soit sur la prise femelle).

- *Jarretières Optiques :*

Elles ne seront pas fournies lors des travaux de câblage. Elles seront prévues lors de l'activation du réseau informatique.

4.4.3. Les cordons de station

Ce sont des cordons RJ45-RJ45 réalisés avec un câble 4 paires F/UTP, 100 ohms, catégorie 6 générique. Les prises RJ45 mâle seront blindées. Ces cordons devront impérativement provenir du même constructeur que celui du système de câblage pour des questions de performances et de garantie.

Ils vont établir le lien entre le matériel bureautique (micro-ordinateur, téléphone, téléviseur) et la prise terminale RJ45. Leur longueur sera de 3 mètres.

4.4.4. Les coffrets et baies 19 pouces

Les locaux de brassage recevront un équipement 19" dont la hauteur dépendra de la densité d'équipements à y installer. Dans tous les cas, ils devront permettre une extension du nombre d'équipements.

Les coffrets seront uniquement prévus dans les zones à faible densité (par exemple la demi-pension).

Les baies seront systématiquement prévues dans tout local de brassage.

- *Caractéristiques des coffrets muraux 19" :*

- Profondeur 600 mm minimum
- Largeur 600 mm
- Porte altuglas verrouillable
- Panneaux latéraux démontables et panneaux de fond
- Toit ajouré
- Kit de ventilation disposé en partie haute pour l'extraction d'air
- Tôle d'acier de 15/10ème
- Montants 19" réglables en profondeur et positionnés de façon à permettre la fermeture de la porte après mise en place de l'électronique, des cordons de brassage et des jarretières (*retrait de 15 cm minimum par rapport à la porte*)
- Trappe passe câbles et cordons sur la face inférieure
- Bandeau de 8 prises 10/16 A 2P+T en partie inférieure avec disjoncteur différentiel alimenté sous tube de type CAPRI pour le branchement des équipements actifs

- Anneaux de flux verticaux des 2 côtés du coffret à raison d'un anneau tous les 4 U

- Kit de masse

4.4.5. Identification

Pour gérer un pré-câblage et les matériels raccordés et pour faciliter la maintenance, il est important de prévoir une bonne identification.

- *Les baies et coffrets 19 pouces*

Le répartiteur est identifié par le bâtiment, l'étage du répartiteur et le n° d'ordre du répartiteur sur l'étage concerné.

Les baies 19" seront numérotées de 1 à N. Une étiquette gravée en caractères noirs sur fond jaune sera posée en tête de chacune d'entre elles.

Cette étiquette rappellera l'identification du répartiteur et indiquera le numéro de la baie 19".

Exemple :

A01-1 désigne la baie n°1 du répartiteur n°1 situé au rez-de-chaussée du bâtiment A.

- *Les panneaux de brassage*

Les rocares

Une étiquette gravée en caractères noirs sur fond jaune sera collée sur les panneaux de brassage pour indiquer l'identification de chaque rocade. On utilisera la convention suivante :

Ra Roo Ree cc 1àX

Nombre de ports de la liaison

Capacité

Numéro du répartiteur d'extrémité

Numéro du répartiteur d'origine

Application dédiée à la rocade précédée de la lettre "R" (I pour informatique, T pour téléphone et F pour autres courants faibles)

Exemples :

RI B01 B31 12FO 1à6 désigne la rocade informatique 12 brins optiques entre les répartiteurs B01 et B31 composée de 6 connecteurs duplex.

RF B01 B31 6FO 1à3 désigne la rocade courants faibles 6 brins optiques entre les répartiteurs B01 et B31 composée de 3 connecteurs duplex.

- *Les prises*

- Les prises terminales

On utilisera la convention suivante :

Rrr – B – b – pp

Numéro de port dans le bandeau

Numéro de bandeau

Numéro de baie

Identification du répartiteur

Exemples :

A01-1-5-15 désigne la 15ème prise du panneau n°5 installé dans la baie n°1 du local de brassage A01

SR-C034-1-22 désigne la 22ème prise du panneau n°1 installé dans le Sous Répartiteur de zone de la salle C034

L'étiquetage des prises sera fait à l'aide d'étiquettes autocollantes installées dans le logement prévu à cet effet sur le plastron de la prise.

- Les prises des panneaux

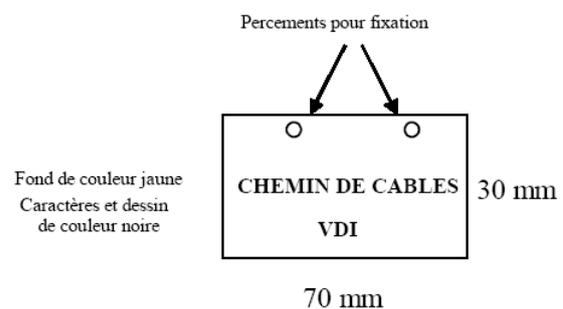
Les ports du panneau seront repérés individuellement par le numéro de bandeau et le numéro de port dans le bandeau.

- Les prises de courant

Les prises électriques seront repérées par l'armoire de rattachement et le numéro de circuit (exemple : TDB1-PCI4 désigne le 4ème départ du tableau TDB1).

- *Les chemins de câbles*

Les chemins de câbles seront repérés tous les 5 mètres par une étiquette du modèle suivant :



4.5. Les règles de mise en œuvre

Les performances de transmission, la fiabilité du réseau et la facilité d'exploitation, dépendent essentiellement du respect des normes, tant du point de vue de l'ingénierie que de l'installation. Les méthodologies de raccordement et d'outillage préconisées par les constructeurs ainsi que les exigences particulières en termes de tirage de câble et de rayons de courbure seront également respectées.

4.5.1. Les conventions de raccordement

Le raccordement des prises RJ45 et des modules de répartition sera réalisé conformément à la convention de raccordement **EIA/TIA 568B**.

Prise RJ 45		Câble
Paires	Points	Couleur
2—	1	Blanc/orange
2—	2	Orange
3—	3	Blanc/vert
1—	4	Bleu
1—	5	Blanc/bleu
3—	6	Vert
4—	7	Blanc/marron
4—	8	Marron
	9	cuivre nu

4.5.2. La compatibilité électromagnétique

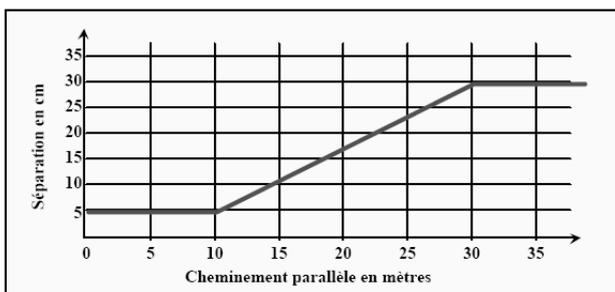
Les sources principales de perturbations électromagnétiques ayant une incidence sur la qualité des transmissions, proviennent

- du réseau électrique environnant,
- des équipements électriques (tubes fluorescents, moteurs, disjoncteurs...),
- des signaux courants faibles véhiculés sur les paires, faisceaux ou câbles voisins,
- de l'environnement radioélectrique du site.

L'installateur prendra les précautions décrites ci-après pour atténuer au maximum ces perturbations.

4.5.3. Séparation entre Courants Forts et Faibles

La distance de séparation indicative entre les câbles courants faibles et courants forts, par rapport à leur cheminement parallèle, ne doit pas être inférieure aux valeurs données dans le tableau suivant mais ne doit pas en excéder deux fois la valeur.



La distance minimale de séparation par rapport au ballast des appareils d'éclairage fluorescent est de **50 cm**. Dans le cas de ballasts électronique, la distance peut être réduite à 30 cm.

On s'écartera d'au moins 1 mètre de tout équipement électrique tournant (moteurs...) ou susceptible de créer un arc électrique (disjoncteurs, contacts selfiques...) et en règle générale de tout équipement générateur de rayonnement électromagnétique.

4.5.4. Isolement des Câbles Courants Faibles

La deuxième cause de perturbation électromagnétique des câbles courants faibles est produite par les signaux transmis sur les paires, faisceaux ou câbles voisins.

Cette perturbation, connue sous le nom de diaphonie ou Next (paires voisines) ou alien Crosstalk (câbles voisins), ne peut être atténuée que par un câblage rigoureux de toutes les terminaisons de câbles et par une mise à la terre efficace de tous les écrans des câbles. L'installateur veillera à respecter tous les conseils concernant les raccordements et les passages de câbles.

4.5.5. La distribution « courants forts »

Les prises de courant destinées au branchement des équipements informatiques devront être desservies par un réseau indépendant à partir du tableau général. Elles devront être protégées par un disjoncteur différentiel 30 mA par groupe de 4 postes de travail PA au maximum.

4.5.6. Les goulottes et plinthes

Elles sont en règle générale utilisées pour la distribution des postes de travail dans les salles de classe ou bureau. Elles auront les caractéristiques suivantes :

- structure aluminium (obligatoire pour les goulottes de sol) ou PVC,
- largeur 160 mm minimum,
- épaisseur 55 mm minimum,
- trois compartiments et *trois couvercles*. La partie centrale sera vide de tout câble et réservée à l'appareillage,
- conformité à la norme NFC 68-102,
- indice de protection IP4X au niveau de l'appareillage. Pour cela, des *clips de sécurité* seront installés de part et d'autre de chaque prise (ou bloc de prises) RJ45 et prise de courant,
- degré de protection *minimum* IK09 pour la goulotte et IK08 pour l'appareillage,
- ouverture des couvercles uniquement à l'aide d'un outil.

Remarque :

- tous les accessoires associés aux goulottes (angles intérieurs / extérieurs variables, angles plats, T de dérivation, joints de couvercles, joints de socles, clips de sécurité) devront être disponibles dans la gamme du constructeur et fournis par l'entreprise,
- l'application de joints silicone est interdite au niveau des découpes.

4.5.7. Les modes de distribution

La distribution des points d'accès doit obéir à certaines règles :

- le point d'accès situé au niveau du tableau devra être situé à gauche ou à droite de ce dernier (jamais en dessous) et les prises seront installées à une hauteur de 1,10m environ (sauf dans le cas de goulottes utilisées en plinthe),

- dans les salles totalement équipées, la distribution se fera soit en goulotte en allège (à une hauteur de 1,10m environ) en périphérie de la salle, soit dans le mobilier (par exemple arrivée des câbles par le sol au niveau de chaque paillasse), soit par des perches pour alimenter des postes de travail en partie centrale,
- dans les salles semi-équipées, la distribution se fera généralement en goulotte en allège à 1,10m du sol en fond de classe.

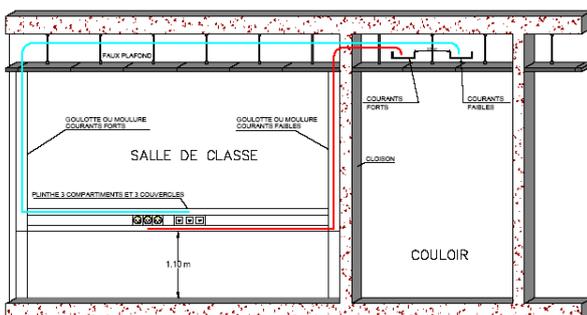
La position des prises dans les goulottes devra être conforme à ce qui suit :

- position horizontale

- appareillage dans le compartiment central,
- prises courants forts à gauche,
- couvercle de 10 cm,
- prises VDI à droite,
- les câbles courants forts et VDI doivent arriver de chaque coté (à gauche pour les courants forts et à droite pour les VDI),
- clips de sécurité de chaque coté de chaque bloc de prises courants forts et VDI.

- position verticale

- appareillage dans le compartiment central,
- prises courants forts en bas,
- couvercle de 10 cm,
- prises VDI en haut,
- les câbles courants forts et VDI doivent arriver de chaque coté (en bas pour les courants forts et en haut pour les VDI),
- clips de sécurité de chaque coté de chaque bloc de prises courants forts et VDI.



4.6. Procédure de validation et de recette

Pour assurer la bonne fin du câblage d'un établissement, la réalisation sera marquée par au minimum trois points de validation par le maître d'ouvrage :

- au début, en réunion de Maîtrise d'ouvrage, où l'entreprise présentera sa solution de mise en œuvre (organisation, composants, locaux de brassage) pour validation par la Région. Une mise au point sur les équipements prévus dans chaque salle ou bureau sera réalisée. Pour cela, l'entreprise remettra au maître

d'ouvrage la liste des locaux et le nombre de prises RJ45 prévues. Le planning sera présenté et l'entreprise avertira la Région lorsqu'elle aura effectué ses premiers raccordements (côté brassage et côté prise).

- en cours de chantier pour valider les premiers raccordements et la procédure de recette. L'entreprise apportera son matériel de test et les cordons adéquats. Une visite de site permettra de vérifier la conformité de l'installation par rapport aux règles de l'art (supports, mises à la terre, contraintes d'environnement).
- à la fin des travaux pour réceptionner l'installation. Une liste de réserves sera émise et devra être levée sous quatre semaines environ. Une seconde visite aura pour objet la levée de ces réserves.

4.6.1. Recette paire torsadée

La procédure de recette doit apporter la preuve que les opérations de câblage ont été effectuées correctement et que les composants n'ont pas été endommagés. Les objectifs de performance sont définis dans les tableaux suivants.

TRES IMPORTANT :

La recette, réalisée par l'installateur, comportera des tests statiques et dynamiques sur la totalité (100%) de la réalisation (prises et rocares).

4.6.2 Tests statiques et dynamiques

Les mesures à effectuer ont pour but de vérifier que chaque paire torsadée, qui est l'élément de base du transport de l'information, est conforme au plan d'installation.

A savoir :

- qu'elle est correctement reliée à chacune de ses extrémités,
- que sa continuité n'a pas été interrompue,
- que sa polarité a été respectée,
- qu'aucun court-circuit n'a été provoqué entre ses deux conducteurs,
- que son isolement par rapport aux autres paires et par rapport à la terre est correct,
- que sa longueur n'est pas supérieure à la valeur autorisée,
- que les deux fils qui la composent sont bien ceux d'une même paire (dépairage),
- que son identification (repère géographique) sur le plan d'installation correspond bien à la réalité.
- que les valeurs suivantes :
 - affaiblissement,
 - paradiaphonie (NEXT),
 - télédiaphonie (ELFEXT),
 - écart paradiaphonique (ACR),
 - paradiaphonie cumulée (PSNEXT),

- télédiaphonie cumulée (PSELFEXT),
- écart paradiaphonique cumulé (PSACR),
- taux de réflexion (RETURN LOSS),
- dispersion du temps de propagation (SKEW), sont bien conformes aux résultats attendus.

Ce contrôle dynamique a pour but de valider et de certifier l'installation par rapport à la norme ISO 11801 édition 2 de 2002.

Les tests permettront de vérifier que les limites des paramètres décrits dans les tableaux suivants jusqu'à des fréquences de 250 MHz minimum ne sont pas dépassées. L'appareil de mesure sera paramétré avec la dernière version de la norme correspondant à la classe E. Les mesures seront réalisées en mode *Permanent link* avec des têtes catégorie 6 génériques.

L'enregistrement et l'affichage des courbes ainsi que la certification réseau jusqu'au gigabit Ethernet sont obligatoires.

Très important : l'entreprise veillera à renseigner la NVP (vitesse de propagation) du câble installé qui figure sur sa fiche technique (à fournir avec le dossier de recette).

L'entreprise devra proposer au maître d'ouvrage pour validation, une méthodologie de test en indiquant le type de testeur retenu, sa configuration, la norme de référence, la bande passante utilisée, une fiche de tests.

Le dossier de recette devra contenir les mesures individuelles avec en tête le résumé des tests.

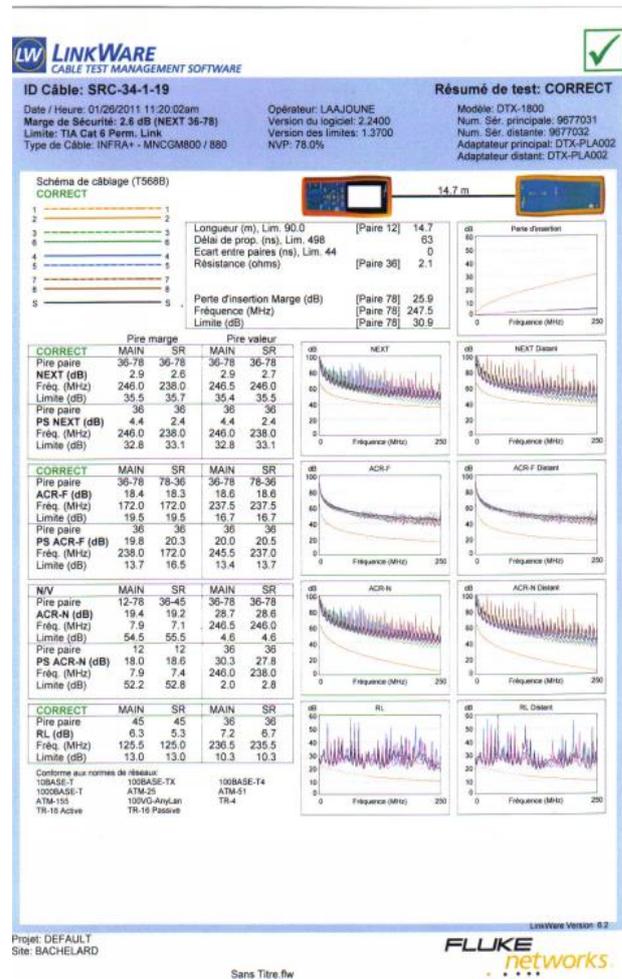
L'entreprise prendra soin de changer les cordons de test toutes les 1000 mesures.

5. Montants des investissements.

L'ensemble du matériel comprend :

- les prises RJ45, avec les noyaux INFRA+
- les prises 2P+T 10/16A avec détrompeur,
- les goulottes 3 niveaux avec les accessoires
- les câbles réseau catégorie 6
- les câbles R02V
- les câbles RCA, VGA et audio
- les disjoncteurs différentiels
- le coffret mural
- les panneaux 24 ports avec les noyaux INFRA+
- les panneaux intercalaires à balai

L'investissement pour ce matériel a représenté une somme d'environ 5 400 € par salle câblée, soit environ le tiers d'un devis réalisé par une entreprise.



6. Fiches recettes et plan de recollement.

Pour valider l'installation, il a fallu fournir la fiche recette de chaque prise réseau câblée ainsi que les plans de recollement des armoires électriques des salles. Cette recette a été réalisée par l'équipe mobile

7. Conclusions.

Cette épreuve a permis de créer de nouvelles situations d'apprentissage et d'évaluation qui créent une osmose pour les étudiants. Elle permet au niveau local d'équiper certaines sections pour leur besoins pédagogiques.

Tous les collègues que j'ai côtoyés ont participé activement pour la réalisation de leur projet.

La section cinéma a tourné trois films pour valoriser les enseignements de STI, (BTS électrotechnique, BTS MAI, BTS IRIS).

Cette dynamique a permis au lycée des échanges entre des sections totalement lointaines, électriciens et cinéastes, électriciens et musiciens, électriciens et informaticiens de réseaux.

Rénovation d'une installation de pompage pour distribution d'eau potable

D. BRUNET, D. WOZNAK

Lycée La Fayette - Champagne sur Seine

Contact : david.brunet@ac-creteil.fr

Résumé : Dans le cadre des projets de 2^{ème} année de BTS Electrotechnique, nous avons développé, au sein du lycée LaFayette, un partenariat avec la société Véolia Eau de Melun. Pour la session 2010, un groupe de quatre étudiants a réalisé une armoire de commande pour une station de pompage alimentant un réservoir de distribution d'eau potable. A l'occasion de cette rénovation, les départs moteurs existants ont été remplacés par des variateurs de vitesse, et l'automate existant remplacé par un automate SOFREL, permettant de gérer, d'une part, l'automatisme de l'installation, et d'autre part, la télésurveillance et la télégestion de la station.

1. Introduction

Depuis maintenant 4 ans, nous avons mis en place, avec la société Véolia Eau de Melun, un partenariat dans le cadre des projets de 2^{ème} année de BTS Electrotechnique. Ce partenariat rentre dans la politique de la société de remplacement et d'uniformisation de ces armoires de commande, qu'il s'agisse des installations de distribution d'eau potable ou des installations de traitement des eaux usées.

Pour la session 2010, un groupe de quatre étudiants a eu en charge la rénovation de l'armoire de commande d'une station de pompage située à Maincy (77), alimentant un réservoir de distribution d'eau potable situé à Blandy les Tours (77). L'armoire existante datait de 1994 et avait subi des modifications sans suivi de schéma.

L'objectif général du projet était de réaliser une nouvelle armoire électrique permettant de remplacer l'actuelle armoire. Cette armoire devait pouvoir commander de manière automatisée l'ensemble de l'installation, assurer une télésurveillance et une télégestion de l'installation.

Dans cet article, après avoir présenté le cahier des charges, nous allons nous attacher au dimensionnement des pompes, aux différentes problématiques rencontrées, à la réalisation des étudiants et aux contraintes de programmation qu'ils ont rencontrées.

2. Présentation du cahier des charges

La station de Maincy comporte trois pompes qui permettent d'alimenter en eau potable un réservoir situé à Blandy les Tours (voir figure 1). Les deux premières pompes, d'une puissance de 9kW hydrauliques, sont commandées en permutation cyclique et le procédé de démarrage utilisé est de type étoile triangle. La troisième

pompe, d'une puissance de 11kW hydrauliques, ajoutée à l'installation suite à une augmentation de la demande, est commandée par un variateur de vitesse. Au moment de la rénovation, cette pompe n'était pas en service.

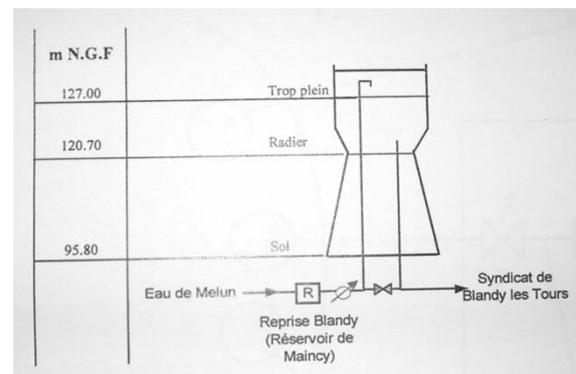


Figure 1 : Situation de la station de Maincy

Le projet consiste à rénover l'ensemble de l'installation de commande de la station en réalisant une nouvelle armoire de commande, intégrant l'ensemble des départs moteurs, ainsi que l'automate de pilotage et de télégestion de type SOFREL S550

Le client souhaite que les départs moteurs des deux premières pompes soient remplacés par des variateurs de vitesse.

Le pilotage de l'armoire doit être assuré par un automate de type SOFREL S550, assurant d'une part, la gestion automatique de la station, et d'autre part, la télésurveillance et la télégestion de l'installation. Cet automate nous est imposé par la société Véolia pour des questions d'uniformité de leurs installations.

Le réservoir étant distant de la station de pompage, un automate S550 est installé sur le site du réservoir et est relié à celui de la station de pompage par une liaison de type LS (liaison utilisant le protocole Modbus).

Les informations de niveaux (« tout ou rien » issues de poires, et analogique issue d'une sonde de niveau) transitent par cette liaison. Par ailleurs, afin de permettre un fonctionnement de la station en cas de perte de liaison entre les deux sites, les informations de niveaux haut et bas (FH et FB sur figure 2) sont reliées de manière filaire entre le réservoir de Blandy et la station de Maincy. De plus, si la communication LS est perdue, une liaison RTC existe entre les deux sites et sert de secours.

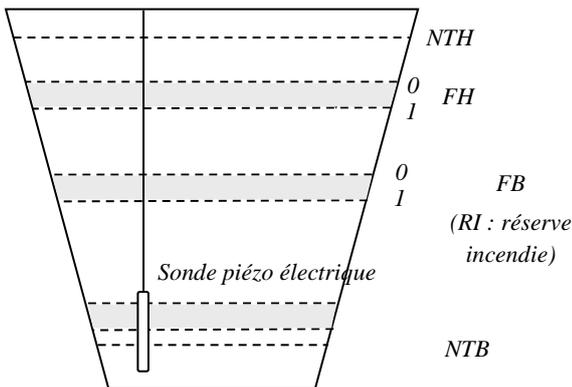


Figure 2 : Répartition des capteurs dans le réservoir

L'alimentation de l'automate, ainsi que ses entrées de communication (LS et RTC), doivent être protégées par des parafoudres afin d'éviter toute détérioration de l'installation. Ces parafoudres seront placés dans un boîtier permettant d'éviter d'éventuelles projections à l'intérieur de l'armoire en cas de défaut.

L'installation doit avoir deux modes de fonctionnement automatique (Normal ou Dégradé) sélectionnés à partir d'un commutateur situé en face avant de l'armoire. Le fonctionnement dégradé permet de faire fonctionner l'installation en cas de défaillance automate, par l'intermédiaire d'une horloge électromécanique et de l'information de niveau FH.

En fonctionnement automatique, les trois pompes sont en permutation cyclique, à chaque demande de marche. Un commutateur permet de choisir de prendre en compte ou non, une horloge interne de l'automate pour la gestion des périodes de remplissage du réservoir. Le niveau du réservoir est régulé autour de la position FH. Néanmoins, si le niveau FB est atteint, deux pompes (P1 ou P2 et P3) sont mise en route, sans tenir compte de l'horloge de fonctionnement, afin, notamment, de garantir le niveau de réserve incendie.

La sonde analogique, qui est placée dans le réservoir, sert actuellement de capteur pour la télésurveillance. Le client nous a demandé de pouvoir l'utiliser comme indicateur de niveau, dans le cas d'une vidange pour nettoyage du réservoir.

Un capteur de débit, reporté sur l'automate, est installé en sortie de la station de Maincy.

La commande de chaque pompe est munie d'un commutateur « Auto/Arrêt/Forcé ». En marche forcée, rien n'empêche le fonctionnement d'une pompe sauf un défaut intrusion et/ou un défaut chlore et/ou un défaut issu du relai de phase.

Lors du pompage de l'eau, du chlore est ajouté. Il est stocké sous forme gazeuse dans des bouteilles situées dans une armoire à l'arrière du réservoir (voir figure 3). Les bouteilles sont équipées d'un manomètre qui délivre une information de type "tout ou rien" qui doit être raccordée sur l'automate.



Figure 3 : Bouteilles de chlore

Le fonctionnement des pompes doit être bloqué si les bouteilles sont vides, quel que soit le mode de fonctionnement automatique ("Normal ou Dégradé") ou forcé. La concentration en chlore est mesurée au niveau du réservoir.

L'installation est équipée d'un système de télésurveillance. En cas d'intrusion, une information TOR sera ramenée sur l'automate, et le fonctionnement de l'installation sera inhibé, quel que soit son mode de fonctionnement.

L'ensemble de l'automatisme sera géré par l'automate SOFREL, à travers l'utilisation de l'atelier logiciel automatisme ST. Pour permettre aux étudiants d'être partiellement autonomes dans la prise en main de cet automate, nous avons mis en place, en début de 2^{ème} année, deux séances de travaux pratiques de mise en œuvre du S550.

3. Validation du dimensionnement des pompes

Dans le cadre du projet, et plus particulièrement, durant la phase d'organisation, les étudiants ont à valider le dimensionnement des pompes. Les seules données communiquées sont la hauteur où se trouvent la pompe (95,8m) et la hauteur que doit atteindre l'eau (127m). En effet aucune donnée sur la longueur des tuyaux, le nombre et la nature des coudes ne sont précisés. Par contre pour ne pas s'affranchir totalement de l'impact des pertes de charge, elles ont été estimées à 40% de la puissance hydraulique théorique calculée, ce

pourcentage est noté μ . Grâce aux données du débit (60 à 80 m³/h) et de la dénivellation, ils ont déterminé cette puissance hydraulique théorique et déduit les puissances de pompage pour ces débits :

$$\begin{aligned} P_{HYDROthéorique} &= \rho \cdot g \cdot \Delta h \cdot Q \\ &= 1000 \cdot 10 \cdot 31,2 \cdot \frac{60}{3600} \\ &= 5200 \text{ W} \end{aligned}$$

pour un débit de 60 m³/h et par le même calcul on a une $P_{HYDROthéorique}$ de 6900 W pour un débit de 80 m³/h. La puissance fournie par la pompe étant la somme de la puissance $P_{HYDROthéorique}$ et des pertes de puissances introduites par les pertes de charge, les étudiants établissent le bilan de puissance :

$$\begin{aligned} P_{POMPE} &= P_{HYDROthéorique} + P_{PERTES} \\ &= (1 + \mu) \cdot P_{HYDROthéorique} \end{aligned}$$

et estiment P_{POMPE} entre 7300 et 9700W.

4. Problématiques

Le projet intègre plusieurs problématiques auxquelles les étudiants doivent répondre.

- La première concerne l'amélioration de la commande des pompes à travers la mise en place de variateur de vitesse.

- La seconde concerne l'optimisation de la supervision locale, avec notamment la mise en place d'une communication entre l'automate et les variateurs.
- La troisième concerne l'uniformisation des armoires de commande à la fois pour ce qui concerne l'interface homme-machine locale et la supervision distante.

4.1. Amélioration de la commande des pompes

Comme nous l'avons précisé (voir §2), les pompes P1 et P2 sont en démarrage étoile-triangle. Afin d'améliorer l'efficacité énergétique à terme, avec la mise en place d'une régulation de débit, le client nous a demandé de mettre en place un variateur de vitesse. Notre choix s'est porté sur un ATV61. L'étude du fonctionnement de la station a montré que les pompes P1 et P2 ne sont jamais en fonctionnement simultanément. Nous avons donc proposé au client de n'utiliser qu'un seul variateur pour le pilotage des deux pompes avec la mise en place d'un contacteur inverseur en aval du variateur, et l'utilisation du relai R2 du variateur pour piloter ce contacteur.

Nous aboutissons donc à la configuration suivante de la partie puissance pour les pompes P1 et P2 (figure 4):

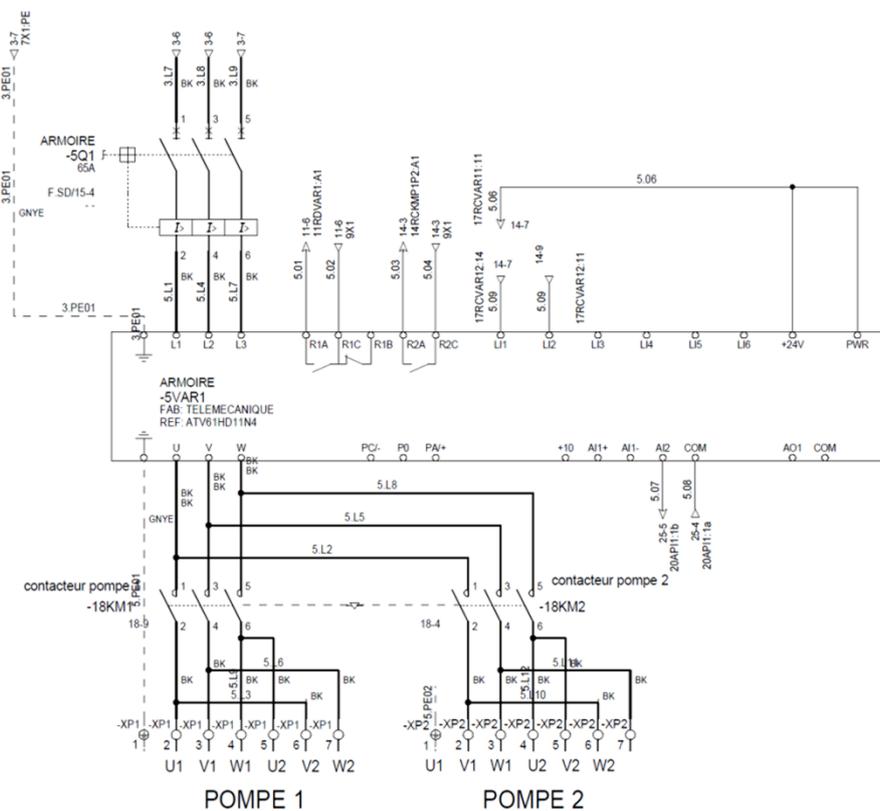


Figure 4 : Schéma de puissance des pompes P1 et P2

Cette solution permet d'économiser le coût d'un variateur, et de gagner de l'espace en termes d'encombrement dans l'armoire finale. Pour l'instant, le

client n'a pas souhaité la mise en place d'une régulation utilisant la variation de vitesse. Il préfère rester avec un fonctionnement de type « tout ou rien » des pompes,

basé sur la régulation du niveau d'eau autour du niveau FH, les variateurs permettant un démarrage progressif. Néanmoins, avec l'implantation de variateur de vitesse, l'option reste disponible au niveau de l'installation. C'est pourquoi l'entrée analogique du variateur est raccordée à l'automate afin de pouvoir reporter l'information de débit ou de niveau pour permettre l'éventuelle régulation.

Le variateur de la troisième pompe, qui était installé à l'extérieur de l'ancienne armoire, a été intégré dans la nouvelle armoire. L'encombrement de ce dernier, dû à son indice de protection IP54 compte tenu de son installation à l'extérieur de l'armoire, a été une contrainte importante dans le choix de l'armoire du projet.

4.2. Optimisation de la supervision locale

Dans le cadre de sa volonté d'uniformisation, Véolia Eau ne souhaite plus qu'il y ait, en face avant des armoires, des ampèremètres ou des voltmètres. Néanmoins, ces informations sont indispensables pour la surveillance de l'installation. C'est pourquoi nous avons proposé de mettre en place un réseau Modbus sur TCP/IP entre l'automate et les deux variateurs (voir figure 5) afin de reporter les informations de fonctionnement des variateurs vers le SOFREL.

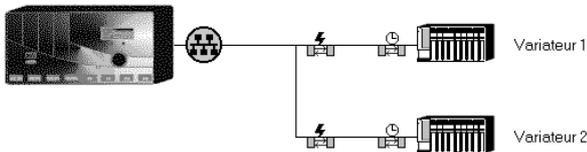


Figure 5 : Vue du réseau TCP/IP entre SOFREL et Altivars

Afin de permettre le raccordement de l'automate SOFREL au réseau TCP/IP, il a fallu lui adjoindre une carte 10BT (carte permettant une liaison 10Base-T (10 Mb/s)) et le configurer en maître. Le débit max de cette carte est de 10Mbit/s. Dans ce cas-là, il peut gérer jusqu'à 30 interlocuteurs pour les interrogations périodiques. Le SOFREL gère uniquement l'adressage IP fixe et ne peut pas réaliser d'auto configuration à partir d'un serveur DHCP. L'adresse se configure directement sur l'interface de la carte 10BT dans le logiciel SOFTTOOLS. Il n'était pas prévu que l'installation soit raccordée à un réseau extérieur, nous avons donc défini des adresses IP privées. Nous avons dû mettre en place un Switch à quatre emplacements pour permettre la connexion des trois équipements.

Les variateurs ont été munis de cartes VW3 A3 310 permettant le raccordement à un réseau Ethernet TCP/IP avec un débit de 10 ou 100Mbit/s. L'adresse IP du variateur se configure directement dans le menu *Communication* du variateur.

Pour pouvoir surveiller chaque variateur, nous avons besoin d'accéder aux différentes informations de fonctionnement (fréquence de sortie, courant moteur, vitesse moteur, état thermique...). Cet accès se fait par une requête Modbus émise par l'automate. Les fonctions Modbus supportées par le variateur sont (figure 6) :

Code (décimal)	Nom Modbus	Description
3 = 16#03	Read Holding Registers	Lecture de N mots de sortie
6 = 16#06	Write Single Register	Ecriture d'un mot de sortie
16 = 16#10	Write Multiple Registers	Ecriture de N mots de sortie
23 = 16#17	Read/Write Multiple Registers	Lecture/écriture de N mots
43 = 16#2B	Read Device Identification	Identification

Figure 6 : Liste des fonctions Modbus de l'ATV61

L'automate SOFREL, configuré en maître sur le réseau supporte quant à lui les codes fonctions suivants (figure 7) :

Code	Fonction
1	Lecture d'informations logiques (ou bits de sortie)
2	Lecture d'informations logiques (ou bits d'entrée)
3	Lecture d'informations numériques (ou mots de sortie)
4	Lecture d'informations numériques (ou mots d'entrée)
5	Écriture d'une information logique (bit)
6	Écriture d'une information numérique (mot)
15	Écriture d'informations logiques (bits)
16	Écriture d'informations numériques (mots)

Figure 7 : liste des fonctions Modbus du S550

Pour notre fonction de surveillance, nous avons utilisé la fonction de lecture de mots de sortie (code 3). Ainsi, pour paramétrer la surveillance périodique du courant moteur, les étudiants ont consulté, dans la documentation variateur, le numéro du paramètre d'état correspondant au courant moteur (voir figure 7),

Code	Description
LcR	Nom du paramètre : Courant moteur Affichage sur le terminal : [Courant moteur] Adresse logique : 3204 = 16#0C84 Index CANopen : 2002/5 Index INTERBUS : 5FB9/06 Path DeviceNet : 2A/0.1/09 (1) 71/01/05 (2)
	Type : UINT Lecture / écriture : R Unité : 0,1 A

Figure 7 : Extrait doc ATV61 : paramétrage com Ethernet

(ici, 3204), ainsi que son format (entier 16 bits non signé) afin de pouvoir configurer la lecture périodique de ce paramètre au niveau de l'automate SOFREL (voir figure 8) et le stocker dans une variable, qui sera rendue consultable par le PC de supervision.

Figure 8 : Paramétrage lecture courant moteur

Nous avons donc pu reporter au niveau de l'automate, au niveau local et au niveau supervision, les paramètres de fonctionnement de chacun des variateurs, et notamment l'information de courant moteur, les ampèremètres ont donc pu être enlevé de la face avant de l'armoire.

4.3. Uniformisation

La société Véolia Eau de Melun a profité de notre collaboration pour initier une uniformisation des armoires dans le cadre de leur politique de renouvellement du parc d'armoire de commande de leurs installations. Jusqu'à lors, toutes les armoires étaient munies d'ampèremètre ou de voltmètre en face avant, il a été décidé de les supprimer pour y implanter l'automate SOFREL, muni d'un afficheur (voir figure 9) qui permet notamment la lecture de ces informations.



Figure 9 : vue générale de l'automate SOFREL S550

Pour donner accès à ces informations à l'utilisateur, il suffit dans le programme de définir des groupes d'information, qui peuvent être éventuellement protégés par un mot de passe, dans lequel on place les informations désirées. Ces informations sont ensuite accessibles sur l'écran graphique de l'automate.

Dans le cadre du projet, les étudiants ont dû reprendre les informations existantes et leurs numéros dans le programme de la station avant rénovation, afin que l'installation de la nouvelle armoire soit la plus transparente possible pour le centre de supervision. En effet, afin de permettre la supervision de l'installation par le central, via la communication RTC, il suffit de donner un numéro SOFBUS à chaque information. Ce protocole propriétaire permet la communication entre l'automate de l'installation et le centre de supervision. Cette information est ensuite consultable depuis le PC de supervision (voir figure 10) situé à l'agence Véolia Eau de Melun.



Figure 10 : topologie de la com avec poste central

Les nouvelles informations créées dans le cadre du projet ont été placées à la suite de celles existantes.

Dans le cadre de l'uniformisation, la face avant des armoires a aussi été revue afin de ne laisser que le strict minimum pour l'interface homme machine locale, et permettre ainsi des interventions simples en cas de déplacement pour maintenance. Les étudiants ont pu proposer la façade avant suivante (voir figure 11) :



Figure 11 : face avant de la nouvelle armoire

Sur la partie gauche sont reportées toutes les informations générales de fonctionnement (défaut chlore, défaut intrusion et réserve incendie) ainsi que les BP et commutateurs de fonctionnement. L'automate en partie centrale permet la lecture de toutes les informations de fonctionnement de l'installation. Sur la partie droite se trouvent les commutateurs et voyants de chaque pompe. Les étiquettes, prévues par les étudiants, ont été mise en place par Véolia, après la livraison de l'armoire.

5. Présentation de la solution élaborée

Dans le cadre de la formation en BTS Electrotechnique, nous formons les étudiants à un logiciel de CAO de schéma électrique (SEE Electrical) qu'ils réinvestissent ensuite dans le cadre du projet. Après la phase d'organisation du projet durant laquelle ils ont dimensionné le matériel principal de l'armoire, les étudiants réalisent, d'une part, les schémas électriques de l'armoire, et d'autre part, la programmation de l'automate ainsi que la configuration des variateurs.

A cause des délais d'approvisionnement du matériel, l'équipe enseignante réalise la conception des schémas avant que les étudiants n'entament le projet. Ceci nous permet de lancer la commande du matériel auprès de notre partenaire industriel au mois de février, afin qu'il soit réceptionné par les étudiants avant la revue de projet de conception (2^{ème} revue de projet).

Nous évaluons le travail de conception de chaque étudiant et ensuite nous leur remettons le dossier de schéma que nous avons réalisé.

Durant la phase de mise en œuvre, ils sont parfois amenés à apporter des modifications au schéma initial.

Pour ce projet, les étudiants ont réalisé l'armoire suivante (voir figure 12) :



Figure 12 : vue de l'armoire réalisée par les étudiants

Afin de gérer l'alternance des pompes P1 et P2 pilotées par le même variateur, nous avons utilisé un relai muni d'un contact OF piloté par le relai R2 du variateur (voir figure13) configuré en commande de contacteur aval (paramètre OCC = R2). Dans un premier temps, nous avons omis d'ajouter un contact du relai aval variateur 1, lequel est commandé par le contact R2 du variateur, en parallèle avec le relai qui commande la pompe 1, afin de garantir la décélération de la pompe 1 en cas de disparition de l'ordre de marche de cette pompe. Les étudiants ont pu solutionner facilement ce problème en mettant en place ce contact et en modifiant le schéma qui leur avait été fourni (voir figure 13).

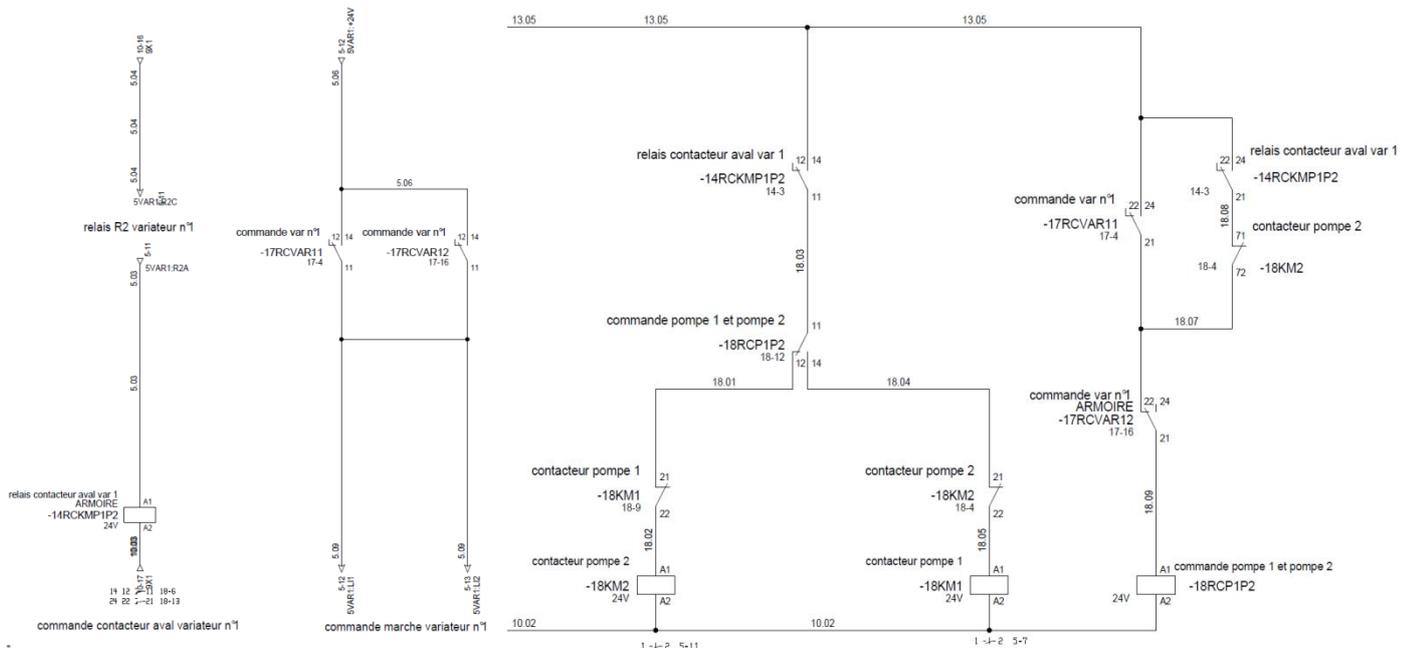


Figure 13 : vue du schéma de commande des pompes P1 et P2 –utilisation du relai R2 du variateur

6. Contrainte de programmation

La prise en main de l'automate SOFREL, bien que la philosophie de programmation soit assez éloignée des standards présents dans nos lycées, s'avère assez aisée par les étudiants. A l'occasion de ce projet, les étudiants ont découvert et utilisé *l'atelier de programmation ST* qui ressemble au langage littéral structuré sous PL7. Cet atelier intègre des fonctions prédéfinies et notamment la fonction SBPermut qui a été utilisée pour gérer la permutation cyclique des pompes. Cette fonction reçoit en entrée :

- Les informations d'activation des actionneurs (le niveau FH pour une pompe et FB pour deux pompes)
- Les informations d'indisponibilité des actionneurs (les défauts généraux (intrusion, chlore, relais de phase), et les défauts variateurs)
- Le nombre d'actionneurs géré (3)
- Les temporisations d'activation et de désactivation

En sortie, on peut directement piloter l'ordre de marche (sortie automate « tout ou rien ») envoyé aux variateurs.

On obtient les chronogrammes de fonctionnement suivant pour deux pompes (voir figure 14):

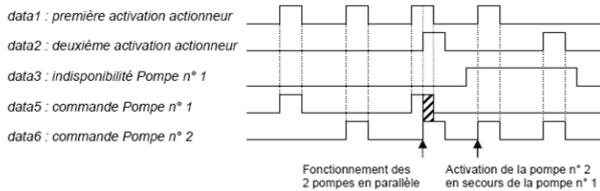


Figure 14 : gestion alternance pompe avec SBpermut

Pour une variable PERMUT de type SBpermut, le programme relatif au précédent chronogramme est le suivant :

```
PERMUT(data1, data2, FALSE, FALSE, data3,
FALSE, FALSE, FALSE, 2, t#0s, t#0s, t#0s);
data5:=PERMUT.OUT_actio1;
data6:=PERMUT.OUT_actio2;
```

Cette fonction permet donc de rendre plus aisée la programmation de l'alternance de fonctionnement des pompes, ainsi que la maintenance du programme.

L'environnement de l'atelier logiciel ST du SOFREL permet d'utiliser un outil de simulation. Celui-ci a facilité la tâche aux étudiants lors de la phase de mise au point du programme. L'outil s'utilise très facilement en faisant glisser les variables du programme dans une fenêtre espion, qui permet ensuite d'activer ou désactiver les variables d'entrée et d'observer l'état des variables de sorties (voir figure n°15).

Nom	Valeur	Description
data1	● FALSE	Relais défaut de phase
data5	● FALSE	Intrusion
data152	● TRUE	Commut FH+H/FH
data156	● TRUE	Niveau Haut "FH"
data64	● TRUE	Plage gestion remplissage
data150	● FALSE	Défaut variateur 1
data158	● TRUE	Auto Pompe 1
data165	● TRUE	Pompe 1
data166	● FALSE	Pompe 2
data167	● FALSE	Pompe 3

Figure 15 : outil de simulation de SOFTTOOLS

7. Réception de l'armoire et suivi du projet

Dans le cadre de la convention que nous signons avec la société pour la réalisation des projets, il est stipulé que les essais de réception sont réalisés au sein du lycée afin de valider le bon fonctionnement de l'armoire, conformément au cahier des charges fonctionnel établi conjointement. Par contre, la mise en service sur site est réalisée par la société.

Ainsi, à l'occasion de la troisième revue de projet de mise en œuvre, les responsables du projet chez Véolia Eau sont venus assister aux essais de réception de l'armoire, et ont ainsi pu valider, avec les étudiants en charge du projet, le fonctionnement de l'armoire, et notamment, la programmation de l'automate et la remontée d'information depuis chaque variateur. Pour cela, ne disposant pas de moteur de puissance équivalente à ceux de l'installation, nous avons dû désactiver la détection de perte phase moteur (paramètre OPL=No) au sein du paramétrage du variateur, ce qui permet de tester le fonctionnement du variateur sans avoir le moteur correspondant à sa puissance nominale.

Cette revue de projet a aussi été l'occasion de valider le report des informations au niveau du centre de télégestion.

Pour cela, l'outil de programmation SOFTTOOLS permet en mode connecté d'avoir accès à toutes les informations du programme, et notamment, les alarmes et les informations de télégestion. On a pu aussi visualiser les échanges entre l'automate et les variateurs à travers l'observation des trames échangées, et valider ainsi les informations échangées.

Après la livraison de l'armoire, conformément à l'engagement pris dans la convention, nous assurons la mise à jour du schéma électrique de l'armoire pour toutes les modifications qui peuvent être apportées, une fois qu'elle est installée sur site.

8. Conclusion

Pour la troisième année consécutive, nous avons pu développer un projet industriel en partenariat avec la société Véolia Eau. Encore une fois, nous avons constaté le regain de motivation de la part des étudiants participants à ce projet. L'objectif de réaliser une armoire à vocation industrielle contribue à renforcer leur volonté de produire un travail de qualité.

Par ailleurs, depuis plusieurs années, nous accueillons des étudiants issus de bac professionnel, et à l'occasion du projet, et notamment du câblage des armoires, ces étudiants peuvent mettre en avant des compétences que les autres n'ont pas forcément, ce qui permet, d'une part, de les valoriser, et d'autre part, de pouvoir garantir à notre partenaire industriel, des armoires correctement câblées.

Enfin, à travers la réalisation de projet de ce type, nous renforçons le lien entre le lycée et nos partenaires industriels, ce qui permet aussi à l'équipe enseignante de maintenir une veille technologique en lien étroit avec les réalités industrielles.

Le SMES comme source d'alimentation impulsionnelle pour le lanceur à rails

P. TIXADOR*, P. LEHMANN**, A. BADEL*, M. AMIET***

* Institut Néel, G2ELab CNRS/G INP/UJF Bât E 25 rue des Martyrs, 38 042 Grenoble Cedex 09 - France

** ISL, 5 rue du Général Cassagnou - BP 70034, 68 301 SAINT-LOUIS Cedex - France

*** DGA/DET/CEP, 7-9 rue des Mathurins, 92 221 Bagneux Cedex - France

Résumé : les lanceurs électromagnétiques à rails autorisent des vitesses extrêmement élevées, au delà de 2000 m/s surclassant les canons à poudre. Les applications dépassent le seul domaine militaire. L'ISL étudie ces lanceurs depuis 1984 avec une approche originale pour les constituants du lanceur et son alimentation. Cet article développe l'alimentation par une bobine supraconductrice qui constitue une source impulsionnelle de courant particulièrement bien adaptée. Les problèmes technologiques restent importants. Les aimants supraconducteurs sont abordés, leur limite en énergie spécifique entre autres. Les gains potentiels de cette solution par rapport aux capacités utilisées actuellement sont exposés, l'énergie de départ est bien réduite pour un projectile et une vitesse données. Le programme de développement de la DGA avec des laboratoires Grenoblois sur ce stockage magnétique supraconducteur est exposé.

1. Lanceur électromagnétique à rails

1.1 Description

Les lanceurs électromagnétiques à rails sont constitués de deux rails conducteurs, parcourus par un courant I , entre lesquels se trouve un projectile comportant une ou plusieurs parties conductrices et pouvant glisser le long des rails (

). Sous l'action du champ magnétique créé par I , le projectile est soumis à la force de Laplace telle que :

$$\vec{F} = I \vec{\ell} \times \vec{B} \quad (1)$$

où ℓ est la distance entre les rails et B l'induction magnétique au niveau du projectile.

L'amplitude F de cette force appliquée au projectile est donnée par la relation fondamentale :

$$F = \frac{1}{2} L' I^2 \left[L' = \frac{dL}{dx} \right] \quad (2)$$

où L' est le gradient d'inductance des rails selon l'axe longitudinal du lanceur.

Ces lanceurs permettent d'accélérer des projectiles jusqu'à des vitesses de plus de 2000 m/s avec des impulsions de courant ayant des valeurs maximales de quelques centaines de kA à quelques MA. Le projectile subit une sollicitation mécanique dynamique très élevée due à l'accélération ($\leq 106 \text{ m/s}^2$).

Dans la pratique, le projectile est un ensemble constitué de plusieurs éléments : la charge utile est solidaire d'un dispositif de guidage (appelé communément sabot), lui-même équipé d'un ou plusieurs ponts de courant. Cette structure transmet les forces accélératrices et assure le maintien en position de la charge utile durant le lancement.

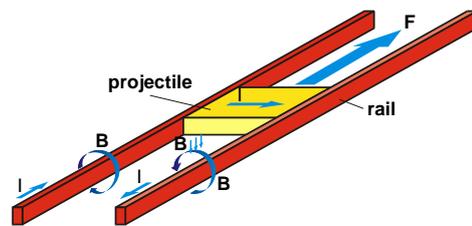


Figure 1 : schéma d'un lanceur électromagnétique à rails.

1.2 Quelques applications

Le remplacement des canons à poudre mis à part, il existe également de nombreuses applications civiles des lanceurs électromagnétiques à rails. En voici quelques exemples :

- accélération de petits projectiles (1 g) à des vitesses très élevées (12 km/s) afin d'étudier les équations d'état des matériaux à ultra-haute pression obtenue à l'impact,
- accélération de particules d'une centaine de milligrammes pour la simulation d'impacts de micro-météorites ,
- application au traitement de surface : utilisation des lanceurs pour générer des plasmas à haute énergie accélérés sur des surfaces métalliques, ceci ayant pour effet de créer des couches surfaciques très dures et très résistantes au frottement,
- injection de particules de deutérium solide dans le plasma à haute température d'un Tokamak,
- mise en basse orbite terrestre (500 km) de nano-satellites,
- éjection, à partir de stations spatiales en orbite terrestre, d'éprouvettes de mesure ou de déchets.

1.3 Les lanceurs électromagnétiques à l'ISL

Dès 1984, l'ISL a lancé des travaux de recherche exploratoire sur l'intérêt des lanceurs électriques et sur l'opportunité de démarrer un programme de recherche sur le sujet.

Les travaux de l'ISL sur les lanceurs électromagnétiques à rails se démarquent de ceux du reste de la communauté internationale de deux façons. D'abord par le choix de ponts de courant constitués par des balais métalliques multifilamentaires utilisés comme contacts électriques glissants, alors que le reste de la communauté utilise soit des conducteurs solides en aluminium (USA, UK) soit des contacts plasma (Japon, Corée). Ensuite, par le choix de la source d'énergie électrique alimentant le lanceur : l'ISL a d'abord utilisé une source d'énergie capacitive modulaire composée de modules de faible énergie (50 ou 150 kJ). Celle-ci est distribuée le long du tube du lanceur et l'injection du courant est synchronisée avec le passage du projectile (alimentation appelée "distribution spatio-temporelle de l'énergie" dite "DES"). Ceci a pour avantages de :

- pouvoir utiliser des commutateurs semiconducteurs (70 kA, 11 kV-12 kV)
- faciliter l'intégration dans un véhicule ou un navire (petits volumes pouvant être dispersés en différents endroits)
- continuer à utiliser le lanceur avec un rendement seulement faiblement réduit, au cas où un de ces petits modules serait défectueux,
- augmenter le rendement du lanceur, l'impédance des rails étant plus faible au fur et à mesure que le projectile avance dans le tube.

Les autres instituts dans le monde travaillent avec des sources d'énergie presque toujours monobloc de un à quelques MJ (nombreux condensateurs de puissance en parallèle, générateur homopolaire ou compulsateur par exemple) et l'injection du courant se fait toujours à l'arrière du lanceur (à la culasse) même si une distribution temporelle de l'énergie peut-être utilisée. Un compulsateur est une traduction libre de l'américain "compulsator" contraction de "pulsed alternator" : il s'agit d'un alternateur à impédance interne réduite qui délivre une impulsion de courant de grande intensité avec des fréquences de l'ordre de 50 Hz.

A partir de 1995 l'ISL a conçu puis construit un lanceur à rails de moyen calibre (≤ 50 mm) de 6 m de long [1, 2]. Ce lanceur a été opérationnel début 1998. En plus d'être alimenté par une source d'énergie capacitive modulaire constituée de 200 modules de 50 kJ chacun. Un module est constitué d'un condensateur de puissance ($C = 0,865$ mF, $U_0 \leq 11,75$ kV) d'un thyristor, d'une diode de roue libre, d'une inductance de formation d'impulsion ($L = 0,28$ μ H) et d'un câble coaxial. Ce lanceur est alimenté en distribution spatio-temporelle de l'énergie. Le long du tube sont placés 13 points

d'injection du courant dont les positions ont été déterminées de manière à optimiser le rendement du lanceur lorsqu'un projectile de 1 kg est accéléré à 2500 m/s (Figure 2). Ce lanceur est actuellement utilisé pour étudier des projectiles avec des charges utiles (interactions mécaniques entre sabot, ponts de courants et charge), les modes de contacts rails/projectile pour de forts courants (≥ 1 MA) pour différents types de matériaux ou encore faire des études préliminaires de projectiles lourds (2 à 4 kg) et équipés de composants électroniques, soumis à de faibles accélérations, adaptés aux applications spatiales [3].

La synchronisation du tir est possible grâce à la détection du passage du projectile à l'aide de sonde B-dot (sonde de variation de champ magnétique) réparties le long du lanceur. L'injection de courant située directement à l'arrière d'une sonde B-dot est automatiquement déclenchée lorsque le projectile est détecté [4] (Figure 3).



Figure 2 : lanceur à rails PEGASUS de 10 MJ.

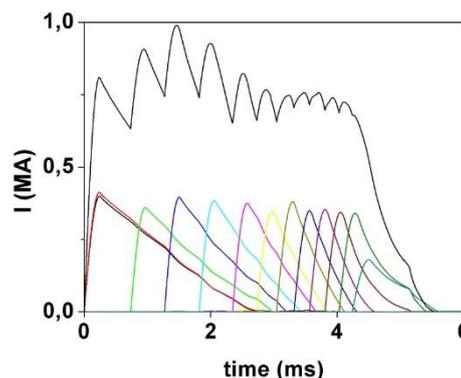


Figure 3 : exemple de variation temporelle de courant injectée dans le lanceur à rails PEGASUS : en couleur, les courants individuels mesurés pour chacune des 13 injections et, en noir, le courant total qui circule dans les ponts de courants du projectile.

1.4 Alimentation

1.4.1 Cahier des charges

Le **Tableau 1** regroupe des caractéristiques de plusieurs lanceurs.

	Petit lanceur	Lanceur pour canon [1]	Lanceur nano satellite [3]
$m_{\text{projectile}}$	0,016 kg	0,36 kg	4 kg
\varnothing	15 mm	45 mm	80 mm
L	2 m	6 m	22 m
I_{max}	165 kA	0,8 MA	1,5 MA
Δt	7 ms	9 ms	21 ms
$W_{\text{cinétique}}$	1,4 kJ	0,9 MJ	9,1 MJ

Tableau 1 : quelques caractéristiques de différents lanceurs.

Il ressort de ce tableau que même pour les « gros » lanceurs, l'énergie finale n'est pas excessive (1 à 10 MJ), mais que le courant est par contre considérable (MA).

1.4.2 Solution actuelle

Un lanceur électromagnétique est pratiquement un court-circuit surtout au début du tir. En première approximation, la résistance et l'inductance du lanceur sont en effet proportionnelles à la distance (x) du projectile par rapport à sa position initiale. Une source de type inductive est donc obligatoire. Pour pouvoir utiliser une capacité, un circuit de mise en forme est par conséquent indispensable. Il s'agit d'une inductance et d'une diode dite de « crowbar » (*Figure 4*), d'où l'évolution temporelle des courants (*Figure 3*).

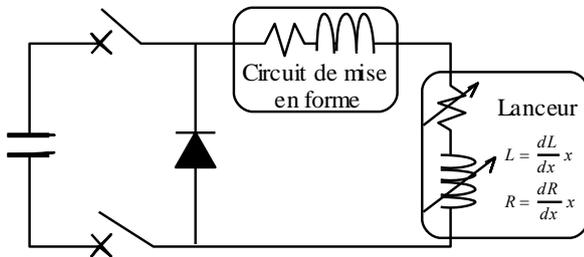


Figure 4 : alimentation d'un lanceur avec une capacité comme source impulsionnelle.

L'inductance possède une résistance R. L'énergie de la capacité est transférée à cette inductance qui alimente ensuite le lanceur. La résistance R entraîne des pertes qui sont importantes pour les petits lanceurs, mais beaucoup moins pour les gros lanceurs (*Tableau 1*).

1.4.2 Inductance supraconductrice

C'est finalement une inductance qui alimente le lanceur dans le cas de capacités comme source impulsionnelle (*Figure 4*). Dans ces conditions, pourquoi ne pas utiliser directement une inductance comme source ? Il faut par contre que la constante de temps de l'inductance soit suffisamment élevée pour que son énergie soit transférée au lanceur et non transformée en effet Joule. Une inductance supraconductrice serait-elle la solution ?

Pour répondre à cette question, nous allons présenter les bobines supraconductrices comme système de stockage puis les travaux menés dans ce domaine avec la DGA.

2. Bobine supraconductrice - SMES

2.1 Présentation

Une inductance supraconductrice (inductance propre L) court-circuitée stocke de l'énergie magnétique (W_{mag}) via le courant (I) qui reste constant puisque la résistance du supraconducteur est nulle.

$$W_{\text{mag}} = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \iiint_{\text{Espace}} B H \, dx dy dz \quad (3)$$

Mills et Files ont mesuré une constante de temps d'une bobine supraconductrice soigneusement court-circuitée supérieure à 105 ans [6]. Le courant est bien constant à l'échelle humaine. La même bobine en cuivre à 300 K, aurait une constante de temps de 20 μs . La supraconductivité est indispensable pour un stockage magnétique sauf pour des durées très courtes, inférieures au dixième de seconde. Quand le court-circuit est ouvert, l'énergie stockée est transférée en totalité ou en partie à la charge en réduisant le courant de la bobine via une tension négative. Une tension positive charge l'aimant. Ce dispositif de stockage magnétique est généralement désigné sous son acronyme anglais : SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage [7, 8]). C'est une invention Française de M. Férier [9] qui visait le nivellement journalié de la production d'électricité. Un SMES est une source de courant. C'est le dual d'un condensateur, source de tension (tableau 1).

Trois éléments principaux composent un SMES comme source impulsionnelle (*Figure 5*) :

- aimant supraconducteur avec sa structure mécanique pour reprendre les forces de Lorentz,
- système cryogénique (cryostat (enceinte cryogénique), cryoréfrigérateur y compris son compresseur, ...),
- contrôle/commande/régulation de l'ensemble (cycles de fonctionnement, cryogénie, protection de l'aimant, ...).

2.2 Performances

Si l'induction magnétique donne la limite d'énergie par unité de volume (équation (1)), les véritables limites de l'énergie stockée dans un SMES sont la reprise des forces considérable de Lorentz liée à l'induction magnétique et aux fortes densités de courant dans les supraconducteurs, ainsi que la stabilité de l'aimant.

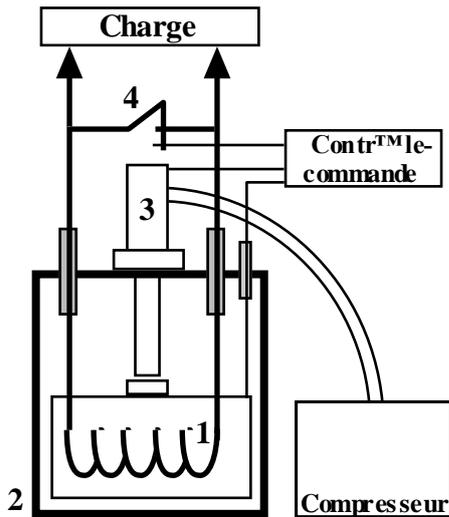


Figure 5 : Schéma de principe d'un SMES comme source impulsionnelle.

Le théorème du Viriel [10] donne une relation entre le poids de la structure mécanique qui reprend les forces d'un aimant et l'énergie magnétique (W_{mag}) de cet aimant. La limite ultime est donnée lorsque toute la structure travaille uniquement en traction. L'expression de la masse minimale est alors :

$$M_{min} = \frac{d}{\sigma} W_{mag} \quad (4)$$

σ : contrainte de traction admissible ; d : densité du matériau de structure.

Cette formule est la même que pour un stockage inertiel. Si la forme du volant d'inertie influence son énergie spécifique, c'est la topologie de l'aimant qui est déterminante pour un SMES. Pour un solénoïde infini la masse minimale est par exemple multipliée par 3 par rapport à la limite ultime (Eq. (4)).

En prenant une contrainte raisonnable de travail de 100 MPa, le théorème du viriel donne pour un aimant avec une structure en acier une valeur ultime d'énergie stockée par unité de masse de 12,5 kJ/kg (3,5 Wh/kg). Des contraintes supérieures à 100 MPa sont possibles, mais l'énergie massique sera toujours limitée à quelques dizaines de kJ/kg. Le record est actuellement détenu par un aimant pour l'astrophysique avec 13,4 kJ/kg [11] (550 kJ / 41 kg pour l'aimant).

La conception mécanique d'un SMES revêt une extrême importance. Le conducteur doit être conçu pour résister à de fortes contraintes et déformations mécaniques sans dégrader ses propriétés supraconductrices. Pour minimiser la masse, il est intéressant que le conducteur reprenne lui-même les forces.

Si un SMES ne stocke qu'une densité massique d'énergie modérée, il peut libérer l'énergie dans un temps extrêmement court. La puissance par unité de masse n'a pas de limite théorique et peut être extrêmement élevée (100 MW/kg). La puissance est

donnée par le produit du courant de l'aimant (I_0) et de la tension maximale admissible (V_{max}) : $I_0 V_{max}$. Pour atteindre des puissances élevées, des courants importants et une excellente isolation électrique sont donc indispensables.

Au cours des charges ou décharges, de l'énergie est perdue à cause des pertes AC dans la bobine supraconductrice et des pertes par courants de Foucault dans le cryostat. Ces deux contributions peuvent être maintenues à un niveau très faible (quelques % de l'énergie stockée). Par conséquent, les SMES montrent un excellent rendement de conversion d'énergie, supérieur à 95 %.

Le nombre de cycles de charge-décharge peut être très élevé, presque infini car il est principalement limité par la seule fatigue mécanique de la structure mécanique.

La maintenance d'un SMES se réduit à celle du cryoréfrigérateur. Les intervalles entre interventions sont en constante augmentation, dépassant une année actuellement. Enfin, un SMES ne comporte ni partie tournante (sauf dans le cryoréfrigérateur) ni matériau nocif.

La Figure 6, ou diagramme de Ragone, compare la puissance et l'énergie par unité de masse pour les SMES et d'autres technologies plus mûres. Pour les SMES, la zone grise indique les valeurs atteintes actuellement. La zone noire couvre des valeurs théoriquement possibles, mais qui nécessitent des recherches et des développements. Comparés aux batteries, y compris au Pb, les SMES présentent une densité d'énergie moindre, mais la densité de puissance est très nettement supérieure. Ces caractéristiques font des SMES des sources de puissance et non d'énergie. Le SMES se place résolument pour les puissances élevées et des temps de décharge courts. C'est une source impulsionnelle d'énergie très bien adaptée au lanceur électromagnétique.

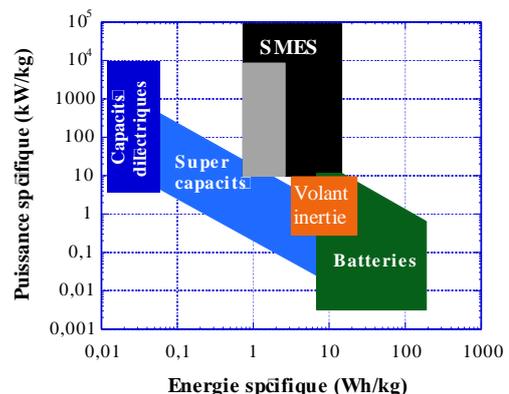


Figure 6 : Diagramme de Ragone pour les SMES, batteries, volants d'inertie et capacités.

3. Alimentation directe par un SMES

3.1 Présentation

Pour toutes les raisons exposées précédemment, le SMES convient tout particulièrement comme source d'énergie pour le lanceur électromagnétique. Le rendement de conversion d'énergie avec un SMES devrait être beaucoup plus élevé comparé aux capacités puisqu'il n'y a plus de pertes dans le circuit de mise en forme. Le schéma de principe est extrêmement simple (**Figure 5**) : le lanceur avec le projectile, le SMES, l'interrupteur et la source primaire. La source primaire charge l'aimant alors que le projectile est enlevé. Une fois chargé, le SMES est court-circuité et le projectile est mis dans le lanceur. Il suffit alors d'ouvrir l'interrupteur pour déclencher le tir.

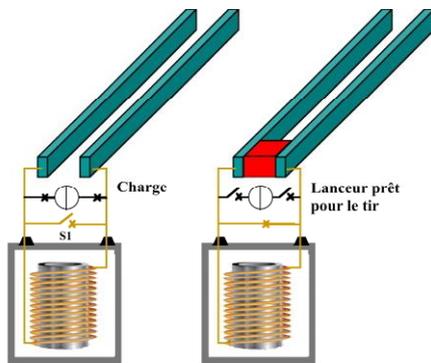


Figure 7 : schéma de principe du lanceur alimenté directement par un SMES.

Le choix de l'énergie initiale du SMES est un paramètre important. Il est intéressant de surdimensionner le SMES en énergie pour que le courant ne varie pas trop lors de la décharge pour maintenir une forte poussée (proportionnelle au carré du courant (Eq. (1)) pendant tout le tir. Avec un surdimensionnement d'un facteur 2, la poussée n'est réduite que d'un facteur 2 entre le début et la fin du tir.

Si les capacités conduisent à gérer forcément des tensions élevées, notamment en phase de stockage, l'alimentation par SMES ne génère aucune forte tension : nulle en mode de stockage, les tensions restent en général faibles (centaines de volts) lors des tirs.

Néanmoins, de nombreuses recherches restent encore nécessaires pour développer un SMES adapté aux lanceurs électromagnétiques. Par exemple, des câbles de très grandes capacités en courant doivent être développés : les lanceurs électromagnétiques nécessitent des courants de plusieurs centaines de kA (**Tableau 1**). Pour augmenter le courant de décharge d'un SMES, l'aimant peut être subdivisé en plusieurs bobines chargées en série et déchargées en parallèle [12]. C'est le montage dual du générateur MARX avec des capacités, chargées en parallèle et déchargées en série pour augmenter la tension. Pour cette raison, il est aussi appelé XRAM.

3.2 Gains théoriques apportés par l'alimentation directe

Plusieurs calculs ont été menés pour quantifier les gains potentiels de l'alimentation directe par SMES. Ils sont regroupés dans le **Tableau 2** en considérant un petit et un « gros » lanceur. Deux hypothèses ont été étudiées avec le SMES : même énergie initiale ($W_{\text{capa}} = W_{\text{SMES}}$) ou bien même courant maximum.

	Petit lanceur ($W_{\text{cinétique}} = 1,4 \text{ kJ}$)			Gros lanceur ($W_{\text{cinétique}} = 800 \text{ kJ}$)		
	Capas	SMES		Capas	SMES	
W_o (MJ)	0,11	0,11	0,03	3	10	2,5
I_{max} (kA)	160	60	160	800	435	800
W_{dis} (kJ)	108	30	28	2100	630	750

Tableau 2 : Performances comparées de lanceurs alimentés par capacité ou SMES.

Le gain apporté par le SMES apparaît nettement sur le rendement énergétique du système. En fait ce gain est important avant tout pour le dimensionnement de la source initiale, peu surdimensionnée par rapport au besoin réel, l'énergie cinétique du projectile. C'est d'autant plus important que l'énergie volumique ou massique d'un SMES reste modérée. Ce point est cependant à nuancer puisque pour maintenir une poussée importante pendant tout le tir, il est préférable de surdimensionner le SMES en énergie.

L'énergie dissipée n'est pas vraiment la grandeur pertinente puisqu'il faut considérer l'énergie pour le système de refroidissement d'un SMES. Celle-ci est rapidement élevée : un cryoréfrigérateur « classique » consomme 7 kW soit 25,2 MJ/heure.

4. Projet DGA/CNRS/ISL

Compte tenu des potentialités militaires des SMES notamment pour les lanceurs électromagnétiques à rails, la DGA a mené un programme important dans le domaine. Il s'est décliné en deux phases :

- Phase 1 (2004 – 2007) avec Nexans et le CNRS pour développer la technologie de base des SMES avec des supraconducteurs à haute température critique,
- Phase 2 (2008-2011) avec l'ISL et le CNRS pour développer notamment les SMES adaptés aux lanceurs, optimiser la chaîne d'alimentation et améliorer la densité d'énergie des SMES.

La phase 1 a permis en particulier de construire un SMES de 800 kJ avec la première génération de conducteurs supraconducteurs à haute température critique, les rubans BiSrCaCuO de la société Nexans [13]. Une autre spécificité de ce SMES (SMES I) et son refroidissement uniquement par conduction thermique à 20 K pour une cryogénie transparente pour l'utilisateur sans manipulation de fluides cryogénique. L'aimant comportait 26 galettes superposées, bobinées sur un support en cuivre pour le refroidissement.

Les essais de l'aimant ont été concluants même si l'énergie théorique n'a pas été obtenue. Un courant de 244 A, soit 80 % de la valeur assignée, a été atteint. En décharge résistive, une puissance maximale de 175 kW et une énergie de 425 kJ ont été mesurées avec une double galette en moins suite à un incident sur une galette. Des décharges rapides ont montré que les pertes dans l'aimant et dans son environnement proche étaient faibles ; l'augmentation de température restait très limitée.

Dans la phase 2, nous avons modifié profondément les SMES I [14] pour avoir deux enroulements indépendants (Figure 8) pour pouvoir les décharger séquentiellement pour modéliser une lanceur à distribution spatio-temporelle. Un des deux enroulements permettait de connecter trois sous enroulements en série ou en parallèle pour tester le procédé XRAM de multiplication du courant.



Figure 8 : SMES II avec deux enroulements électriquement indépendants.

5. Conclusion

Les lanceurs électromagnétiques à rails permettent d'atteindre des vitesses de plus de 2000 m/s pour des projectiles, voire des nano satellites. Les solutions actuelles pour leur alimentation ne sont pas pleinement satisfaisantes notamment en terme d'encombrement. Un aimant supraconducteur constitue une source impulsionnelle de courant bien adaptée au lanceur. Les défis technologiques restent nombreux, mais le projet DGA sur ce sujet a permis de bien progresser notamment dans la technologie des aimants supraconducteurs à haute température critique pour cette application.

Bibliographie

- [1] P. Lehmann, H. Peter, J. Wey, "First Experimental Results with the ISL 10 MJ DES Railgun PEGASUS", *IEEE Trans. On Magnetics*, vol. 37, 2001, pp. 435-439.
- [2] P. Lehmann, Les lanceurs électromagnétiques à rails de l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis, *La Revue de l'Électricité et de l'Électronique (REE)*, 2000, pp. 88-93.
- [3] P. Lehmann, B. Reck, M.D. Vo and J. Behrens, Acceleration of a Suborbital Payload Using an Electromagnetic Railgun, *IEEE Trans on Magnetics*, vol. 43, 2007, pp. 480-485.
- [4] J. Wey, D. Eckenfels, C. Gauthier, R. Charon, High accuracy measurements on railguns, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 31, 1995, pp. 764-769.
- [5] J. File, R.G. Mills, "Observation of persistent current in a superconducting solenoid", *Physical Review Letters*, vol. 10, 1963, pp. 93-96.
- [6] W. Hassenzahl, "Superconducting Magnetic Energy Storage", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, 1989, pp. 750-758.
- [7] C. A. Luongo, "Superconducting Storage Systems: an overview", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, 1996, pp. 2214-2223.
- [8] M. Ferrier, "Stockage d'énergie dans un enroulement supraconducteur", *Low temperature and Electric Power*, Pergamon Press, 1970, pp. 425-432.
- [9] F. C. Moon, "The virial theorem and scaling laws for superconducting magnet systems", *Journal Applied Physics*, vol. 53, 1982, pp. 9112-9121.
- [10] A. Yamamoto, Y. Makida, H. Yamaoka, H. Ohmiya, K. Tanaka, T. Haruyama, T. Yoshida, K. Yoshimura, S. Matsuda, K. Kikuchi, Y. Ootani, and S. Mizumaki, "A Thin Superconducting Solenoid Magnet for Particle Astrophysics", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 12, 2002, pp. 438-441.
- [11] P. Dedié, V. Brommer, A. Badel, P. Tixador, *Three-Stage Superconducting XRAM Generator*, To be published in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, August 2011.
- [12] P. Tixador, B. Bellin, M. Deleglise, J.C. Vallier, C.E. Bruzek, S. Pavard, J.M. Saugrain, "Design of a 800 kJ HTS SMES", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, 2007, pp. 1707-1710.
- [13] A. Badel, P. Tixador, K. Berger, M. Deleglise, "Design and preliminary tests of a twin coil HTS SMES for pulse power operation", *Superconductor Science and Technology*, vol. 24, 2011, 055



L'épopée hydroélectrique d'après guerre : vision d'un ingénieur

Daniel DAVID

Directeur de Recherche au CNRS
8, avenue Maréchal-Montgomery, 27200 Vernon
daniel.david@hamilcar-barca.com

Résumé : *Le roman de Philippe Gillet intitulé « La meilleure part » a pour thème la construction du barrage d'Irîl Emda, en Algérie. Il décrit l'enthousiasme des jeunes ingénieurs participant à l'épopée hydroélectrique de l'après-guerre. Ce roman a été adapté au cinéma, avec Gérard Philipe en tête de la distribution. Le film, tourné au barrage de Plan d'Amont, dans les Alpes, conserve une grande valeur documentaire. Il montre le matériel et les techniques de construction des années cinquante. C'est aussi un reportage sur l'état d'esprit et les conditions de travail du personnel employé sur les chantiers des grands barrages.*

1. Introduction

A deux reprises en vingt-cinq ans, lors des guerres mondiales, l'Algérie dut supporter une grave pénurie de combustibles locaux, entraînant une semi-paralysie des transports et un ralentissement de l'industrie qui, même en temps de paix, était déjà peu développée. Dès la seconde moitié des années quarante, l'Administration algérienne entreprit pour cette raison de valoriser les ressources hydrauliques naturelles. Cette politique était en outre favorable à la Métropole dont la production de charbon était d'environ 50 millions de tonnes avant la guerre, pour une consommation de 75 millions de tonnes, donc fortement déficitaire.

Ce vaste programme d'équipement hydraulique permit de satisfaire aux besoins des pompes d'irrigation, au développement des industries de transformation des produits agricoles, au développement des industries mécaniques qui avaient tellement fait défaut durant la guerre, ainsi qu'à l'électrification des chemins de fer. L'augmentation du confort des habitations contribua également à la croissance de la consommation. *« L'équipement énergétique au moyen des grands barrages était indissociable de l'hydraulique agricole, source de fertilisation des terres permettant l'installation de nouveaux colons, le paysannat musulman allant de pair avec la colonisation d'origine européenne. Ce programme relevait d'un établissement public, le Service de la Colonisation et de l'Hydraulique. »* [1].

Trois grands programmes d'aménagement furent alors entrepris en Petite Kabylie. Cette région montagneuse, au

bord de la Méditerranée, est en effet la seule qui soit abondamment arrosée. Les pluviométries annuelles moyennes y sont comprises entre 1,50 et 2 mètres [2]. Ces programmes furent ceux de l'oued Agrioun (110 millions de kWh/an), de l'oued Djendjen (140 millions de kWh/an) et de l'oued Bou-Sellam (180 millions de kWh/an).

A une égale distance d'Alger et de Constantine, ils devaient être reliés à ces villes par des lignes à 150 kV. Ces équipements hydroélectriques n'excluaient pas la modernisation des centrales thermiques, les parts respectives des deux sources d'énergie devant à terme être de 2/3 et 1/3.

A titre de comparaison, le barrage de Génissiat, construit à la même époque et qui fut l'un des grands chantiers de l'après-guerre avec Donzère-Mondragon, produit 1 700 millions de kWh par an. Mais, l'oued Agrioun n'est pas le Rhône.

Ces grands travaux furent effectués dans une large mesure par des entreprises métropolitaines, qui dépêchèrent sur place un personnel d'encadrement spécialisé. L'un de ces ingénieurs, affecté au barrage d'Irîl Emda, sur l'oued Agrioun, tira de cette expérience un roman qui a aujourd'hui valeur de reportage. Peut-être serait-il cependant oublié si une adaptation cinématographique n'était venue lui donner l'aura d'un comédien célèbre.

Le barrage du roman, transposé de l'Algérie au Maroc, est fictif. Son nom est tout aussi évocateur : Ali Médir (Figure 1).

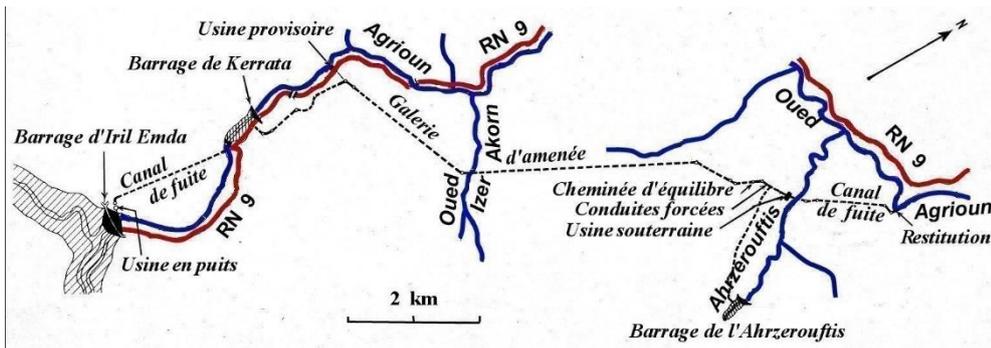


Figure 1 L'aménagement de l'oued Agriouan, avec les barrages d'Irtil Emda, de Kerrata et de l'Ahrzerouftis (d'après A. Lambert, op.cit.)

2. Le site hydroélectrique d'Irtil Emda

L'équipement de l'oued Agriouan fut conçu en fonction de caractéristiques propres à l'Afrique du Nord [3]. Son bassin versant occupe une superficie de 665 km² et la hauteur annuelle des précipitations, observée de 1923 à 1939, est de 768 mm.

« Toutes les rivières algériennes, qu'elles soient abondantes ou pauvres, sont irrégulières et posent à l'hydraulicien les mêmes difficiles problèmes de régularisation et d'évacuation des crues [4]. »

Cet équipement comprend essentiellement, de l'amont vers l'aval:

- le barrage d'Irtil Emda, avec une retenue de 150 millions de m³ à la cote 522, permettant la régularisation annuelle, et même pluriannuelle, de l'Agriouan ;

- une usine hydroélectrique en puits, turbinant les eaux de la retenue sous une chute d'environ 80 m, selon le remplissage de celle-ci. Rappelons que la puissance fournie par un groupe hydroélectrique (turbine couplée à un alternateur) est proportionnelle au produit de la hauteur de chute par le débit de la turbine, selon la règle approximative des deux-millièmes [5]. Pour l'usine de l'Irtil Emda, deux groupes verticaux comprenant une turbine Francis pour 30 m³/s (chutes de hauteurs moyennes) et un alternateur de 12 000 kVA, production annuelle de 30 millions de kWh. Ces données se réfèrent à l'époque de la construction des ouvrages, vers 1950, qui est celle du roman de Saint-Gil ;

- une galerie de fuite souterraine de 2 km, jusqu'au barrage de régularisation de Kerrata, à l'entrée des gorges de Chabet el Akra ; ce barrage-voûte de 35 m de hauteur retient 900 000 m³ ;

- à partir de ce barrage, une galerie d'amenée de 8 370 m, se terminant par une cheminée d'équilibre, en tête de deux conduites forcées de 590 m ; elles alimentent l'usine souterraine de l'Ahrzerouftis sous une hauteur de chute maximale de 374 m. Cette usine comporte deux groupes verticaux, avec une turbine Pelton pour 21,2 m³/s (chutes de grande hauteur) et un alternateur de 33 000 kVA. Elle produit 146 millions de kWh par an. Une cheminée d'équilibre est une enceinte d'expansion destinée à amortir les phénomènes oscillatoires engendrés dans les canalisations en charge par la manœuvre des vannes ;

- un canal de fuite de 1650 m, restituant les eaux dans le lit de l'Agriouan à la cote 60 ;

- enfin, un barrage-voûte annexe sur l'oued Ahrzerouftis, affluent de l'Agriouan, assure une régulation journalière avec une retenue de 290 000 m³ ; il est associé à un groupe vertical, turbine Francis pour 3,8 m³/s et alternateur de 5 200 kVA.

Le barrage d'Irtil Emda est la pièce maîtresse de cet aménagement. En effet, l'irrégularité du débit de l'Agriouan, la faiblesse et la durée des étiages, ne permettent pas de faire fonctionner au fil de l'eau l'usine de l'Ahrzerouftis, même en utilisant le barrage de Kerrata. Les études géologiques et géotechniques ayant montré la médiocre qualité des sols et des appuis latéraux du verrou topographique d'Irtil Emda, la construction d'un barrage en béton fut exclue et on retint la solution d'une digue. Celle-ci a sur le barrage l'avantage d'une certaine souplesse, lui permettant de suivre les déformations du sol. Cette technique avait déjà été utilisée, notamment pour les barrages du Ghrib dans l'Algérois, de Bakhadda et de Bou-Hanifia en Oranie (Figure 2).

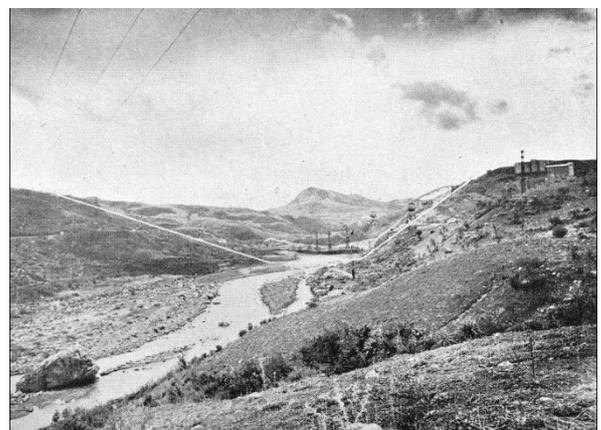


Figure 2 Le verrou de l'Irtil Emda, vu de l'aval. Le titre du roman est inspiré par la défaillance du joint de raccordement entre le masque et la rive droite (d'après A. Lambert, op.cit.).

Pour les matériaux d'Iril Emda, on exploita les pierriers du voisinage, au pied des abrupts calcaires. L'un d'eux, à 2 km au nord-ouest de l'ouvrage, fut exploré en profondeur à l'aide de galeries de reconnaissance. Il apparut qu'il était constitué de pierrailles calcaires de petites dimensions, de granulométrie homogène, en quantité largement suffisante pour fournir les 6 millions de tonnes nécessaires à la construction de la digue. Les terrassements représentèrent 1 million de m³.

Par sa nature même, l'ouvrage se prêtait mal à la construction de déversoirs de crues. Ceux-ci furent regroupés avec l'usine dans un bloc bétonné situé au milieu de la digue, avec une capacité d'évacuation de 2 500 m³/s pour la cote 520, niveau d'eau normal dans la retenue (crue dite millénaire) [6]. A la cote 535, ce débit passerait à 3 500 m³/s.

Une autre particularité de l'ouvrage fut l'obtention de l'étanchéité par application, sur le parement amont de la digue, d'un masque en béton bitumineux, protégé par un revêtement en béton armé [7]. Le raccordement de ce masque au terrain avoisinant s'avéra très délicat et nécessita des ouvrages spéciaux (Figure 3).

Ces travaux furent réalisés par un groupement d'entreprises piloté par la SATT, Société Anonyme Truchetet & Tansini [8]. Le masque fut sous-traité à une firme spécialisée, Le Soliditit Français, qui confia le chantier à un jeune ingénieur, Philippe Gillet (1923 - 2009). Celui-ci y trouva l'inspiration de son premier roman, *La meilleure part*, publié en 1954.

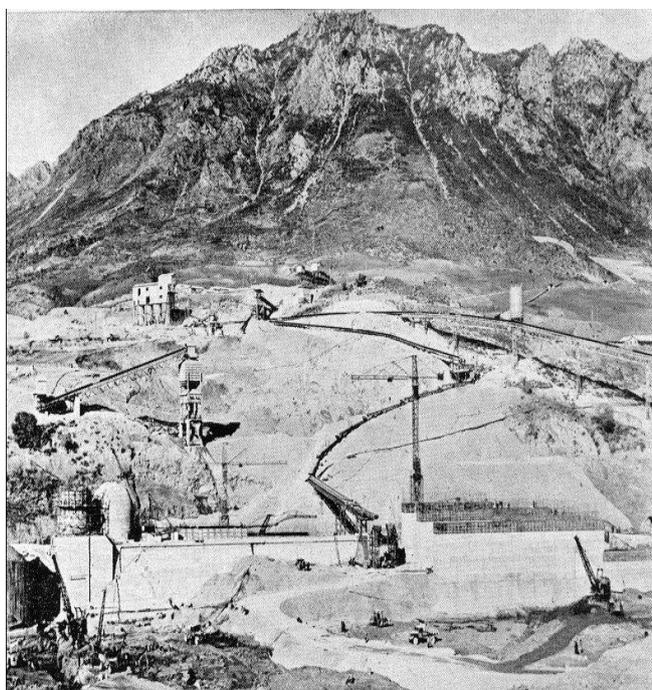


Figure 3 Le barrage en construction : le massif central en béton et les installations de chantier pour la mise en place de la pierraille (d'après A. Lambert, op.cit.).

3. Le roman

Le personnage central est Christian Maréchal, un ingénieur de vingt-neuf ans affecté au chantier du barrage d'Ali Médir. Autour de lui, ses collaborateurs, chefs d'équipe, conducteurs de travaux, moins diplômés que lui, mais plus expérimentés, qui suivent leur chef par estime pour sa compétence et son engagement de jour et de nuit à l'œuvre commune. Au-dessus, Fritz, le directeur du chantier.

Le décor est planté dès les premières pages : un barrage en enrochements, cinq millions de tonnes de cailloux, entassés sur quatre-vingt-dix mètres de hauteur, le tout posé sur une fondation de mauvais schiste. Pour ce faire, on enlève une colline, un peu plus haut, et on la transporte, camion par camion, au fond du défilé, jusque dans la fouille ouverte.

« Maintenant, c'est à Christian de jouer. A lui et à son équipe. De s'attaquer à cette paroi d'enrochements, poreuse comme une passoire, et de la rendre étanche, en plaquant sur elle un revêtement imperméable : le *masque*. » [...] C'est un travail délicat. Et pour le *Chantier du Masque*, il n'y a qu'un responsable, qu'un ingénieur : lui, Christian. »

Le récit est celui de la vie du chantier, des rapports entre les hommes, de la constante responsabilité du chef face aux imprévus. Quelques temps forts s'en dégagent, et tout d'abord l'inspection de Renaud, Directeur de l'Équipement, « l'homme qui a fait Génissiat et Donzère ». Les camarades de Christian l'ont prévenu : « Il y a différentes *tuiles* possibles pour un ingénieur qui dirige un chantier. Toutes n'ont pas la même gravité. [...] ...au-dessus de tout ça, comme *super-catastrophe*, il y a l'inspection de ton chantier par un grand homme. »

Ils s'affrontent d'abord au sujet de l'épanduse à enrobés pour le revêtement étanche, dont la mise au point est difficile. Vient ensuite le problème du raccordement du masque au rocher de la rive droite. En conclusion, Renaud prescrit de le démolir et de le refaire. Devant le désarroi du jeune ingénieur, il s'efforce de le reconforter :

« Oui, maintenant, je suis riche et envié. Eh bien ! croyez-moi. Malgré tout cela, malgré votre souffrance d'aujourd'hui, à cause de cette souffrance même, quand je pense à votre vie, maintenant, et à la mienne, je vous envie. Parce que...

« Les deux hommes se regardent une dernière fois. Tous les deux ont du mal à masquer entièrement leur émotion. Et Renaud achève :

« - ...parce que c'est vous qui avez la meilleure part ! »

L'intérêt de cette scène, qui a donné son titre au livre, est qu'il s'agit d'un roman à clés. « Maréchal, Merle, Bonneuil y sont de jeunes ingénieurs qui, sur le barrage d'Ali Médir (anagramme d'Iril Emda) se heurtent à leurs aînés Fritz, Thibaut et au maître

d'ouvrage Renaud, personnages tous reconnaissables aux dires des témoins [9]. »

Le récit s'inspire de faits réels, comme la crue de l'Agrioun qui faillit noyer la fouille ou bien encore le 5^{ème} Congrès international des Grands Barrages, que l'auteur situe au Caire alors qu'il eut lieu à Paris en juin 1955 (Figure 4).

Il y a aussi une réflexion sur le métier d'ingénieur, ce dialogue avec un collègue américain venu visiter le chantier. Ils observent la ronde incessante des Tournarockers, ces gros tombereaux articulés de 20 tonnes qui font la navette entre le pierrier et la fouille du barrage.

« - Pourquoi ne les arrêtez-vous pas ?

« - Parce qu'il faudrait en avoir quarante au lieu de vingt. On ne les a pas.

« - En Amérique, on les aurait.

« - En France, on ne les a pas. Pour une entreprise française, acheter vingt Tournarockers, cela a déjà représenté un gros effort financier. Quarante, elle n'aurait pas pu. Alors on se débrouille avec vingt. »

[...]

« Pour les hommes, c'est comme pour le matériel. Sur un chantier comme ici, qui marche jour et nuit, chaque ingénieur devrait être doublé.

« - C'est évident.

« - Ce n'est pas le cas. Pour chaque travail à diriger, il n'y a qu'un ingénieur. Cet unique ingénieur doit être là le plus tôt possible le matin et le plus tard possible le soir. Et on vient, en plus, le réveiller de temps en temps au milieu de la nuit, chaque fois qu'il y a un pépin... C'est-à-dire assez souvent.

« - Mais vous ne pouvez pas tenir le coup, à un rythme pareil !

« - Il faut croire que si. »

Plus loin, ils évoquent cette technique alors nouvelle du barrage en enrochements, retenue pour Ali Médir :

« La solution classique est toujours la plus chère. Nous n'avons pas les moyens de nous la payer. La France veut faire de grands travaux avec peu d'argent. Pour cela, le seul moyen est d'abandonner la technique courante. Seulement, chaque fois, on prend des risques. [...] Pour faire des essais, il faut avoir de l'argent. On n'en a pas. Tandis que des hommes de génie, on en a encore quelques uns. C'est notre dernière richesse. Alors, on marche avec ce qu'on a. »

Et l'Américain de conclure :

« - Vous êtes de drôles de types. »

Evoquons l'entrevue avec le Directeur Général, à Paris :

« Un silence religieux pesait sur le bureau directorial, un peu comme sur une chambre de malade. C'était la même atmosphère feutrée, d'ailleurs. On était tenté de marcher sur la pointe des pieds.



Figure 4 La couverture du roman, avec la photo inspirée du film. Remarquer l'élégance de Gérard Philipe, censé parvenir au sommet d'un plot.

Derrière la table de marbre, Valois-Sicart, Directeur Général, réfléchissait.

« Devant lui, presque au garde-à-vous, le Directeur du Matériel et le Directeur des Travaux attendaient.

« Au bout du bureau, un bloc de sténo à la main, une secrétaire, crayon levé, attendait elle aussi.

« Christian s'arrêta à trois pas du bureau et, pour faire comme tout le monde, décida d'attendre... »

Il n'y a pas de femme dans *La Meilleure Part*. Tout au plus une évocation discrète de Claire, restée en France... amie, épouse, on ne sait... un temps très proche, plus lointaine maintenant, sans que l'on sache qui s'est éloigné de l'autre. La femme de l'ingénieur Chennevière, elle, est à Alger avec les enfants. Elle aurait tant voulu que Christian autorisât son mari à les rejoindre pour Noël ! Ce prénom fut ensuite choisi par Mme Gillet comme pseudonyme littéraire : Claire Vallières. Le couple formé par Christian et Claire réapparut en 1981 dans *Le vendredi des banquiers*. De même, le centralien Chennevière dans *L'île d'acier*.

Une réédition de ce roman parut chez Laffont en 1969, avec un texte légèrement modifié sous l'influence du film; il n'y gagna rien [10]. Le titre devint *Le barrage*, sans originalité, et Ali Médir fut rebaptisé Almédières. D'entrée de jeu, au lieu de descendre du rapide de Casablanca, Christian Maréchal débarque en gare de Modane. C'est logique, il a passé la nuit précédente en avion, non

plus de Paris à Casa, mais de Casa à Paris ! Le texte qui suit, inchangé, ne s'applique donc plus du tout à la Maurienne, où fut tourné le film, ce qui n'a évidemment pas échappé à l'auteur. Il y a quelques modifications, la principale étant en finale le mariage avec Claire et non plus la séparation. Cette réédition a surtout un intérêt de curiosité.

4. Le film

Le roman bénéficia de la publicité d'une rapide adaptation au cinéma, dès 1956 (Figure 5).



Figure 5 Il existe deux autres modèles d'affiche, représentant Gérard Philippe seul en dessin stylisé. L'une d'elles est reproduite sur la pochette du DVD. Elles sont esthétiquement très inférieures à celle-ci.

En cinémascope et Eastmancolor, dans une réalisation d'Yves Allégret, elle fut portée par une distribution de qualité réunie autour de Gérard Philippe. Le film est disponible sur DVD aux éditions René Château, image et son restaurés.

Selon la hiérarchie de célébrité résultant de l'affiche, les deux principaux rôles secondaires étaient tenus par Gérard Oury et Michèle Cordoue, avec une place de choix pour Marcel Bozzuffi [11].

Le principal intérêt du film est aujourd'hui ce reportage sur le site de construction d'un grand barrage, qui employait quatre cents personnes (Figure 6).

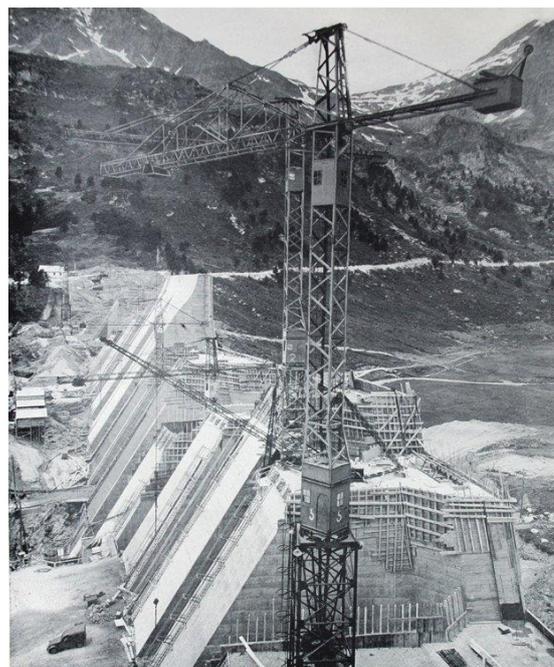


Figure 6 Le chantier de Plan d'Amont, montrant la construction par plots. Au fond, la rive droite. Les installations de chantier étaient sur la rive gauche. Le barrage de Plan d'Aval, non visible, est en contrebas à gauche. L'état d'avancement est sensiblement le même que lors du tournage du film. Au début de celui-ci, un ouvrier tombe du coffrage qui se trouve sur le premier plot, derrière la sapine (Documentation EdF).

Il s'agit de Plan d'Amont, l'un des deux barrages d'Aussois [12]. Achevé en 1956, il est sensiblement contemporain d'Irîl Emda. La similitude s'arrête là car les deux ouvrages diffèrent complètement. Le second est un barrage-poids évidé, en béton, d'une hauteur de 46 m et d'une longueur en crête de 340 m. Il a été construit selon la méthode des plots accolés. Le barrage de Plan d'Aval fut achevé en 1951, celui de Plan d'Amont en 1956, l'un et l'autre par Truchetet & Tansini (Paris) en association avec l'entreprise J. Pascal (Grenoble). Le procédé de construction par plots permet de réduire les contraintes thermiques lors de la prise du béton.

Le film montre les échafaudages qui permettaient l'escalade de ceux-ci par leur face inclinée, le déverrouillage des bennes de béton d'un coup de masse, l'abattage à l'explosif dans la carrière, les véhicules utilitaires d'après-guerre, les installations de chantier et les bâtiments aujourd'hui disparus pour la plupart, sur un site devenu une attraction touristique. Le bâtiment affecté au logement des ouvriers subsiste seul ; des scènes d'intérieur y furent tournées. On voit les installations de chantier de la rive gauche, dont il ne reste presque rien. En 1984, la route d'accès aux barrages de Plan d'Amont et Plan d'Aval fut transférée à la commune d'Aussois. Elle dessert également le site de Bois d'Aussois, en tête des conduites forcées qui alimentent les usines hydroélectriques d'Avrieux et la soufflerie de l'ONERA.

Comme bien souvent, le lecteur du livre est déçu par une transposition qui semble avoir pour but de mettre en valeur Gérard Philipe. Son personnage cumule les poncifs : le jeune ingénieur au grand cœur, bon avec autrui et dur avec lui-même, qui a eu dans le passé une liaison avec l'insignifiante infirmière, laquelle est bien au courant du mauvais état de santé qui le contraindra à abandonner le chantier... L'autre ingénieur est Gérard Oury, finalement plus proche de Christian Maréchal, le héros du livre, lui-même transposé de la personnalité de Saint-Gil. Le personnage de Valois-Sicart a disparu, au profit du médecin dont Micheline est la collaboratrice.....qu'en dire ?... malgré sa pipe, il est transparent !

La plus forte personnalité du film, en petits caractères sur l'affiche, est celle de Georges Chamarat, le chef mineur. En effet, si on a créé de toutes pièces l'infirmerie, on a introduit également le travail dans une galerie souterraine. C'est la technique classique au marteau-piqueur et à l'explosif, mise au point par Sommeiller un siècle plus tôt pour la foration du tunnel du Fréjus, dans la même vallée [13]. Le barrage de Plan d'Amont ne comportant pas de galerie d'amenée d'eau, ces scènes, ainsi que celles du téléphérique et du mariage, furent tournées au-dessus de Bonneval, près du col de l'Iseran [14]. Il s'agissait de l'aménagement de la chute de Val d'Isère, mis en service en 1959. Ces téléphériques ont presque tous disparu. Il subsiste dans la vallée celui de Bissorte, en raison des difficultés d'accès au barrage de ce nom [15].

Un autre aspect du film est digne d'intérêt, sa dimension humaine. Si les scènes d'allégresse des ouvriers apprenant l'octroi d'une prime traînent en longueur, on y voit les risques encourus et, pour nombre d'entre eux, une profonde misère morale. C'est le cycle d'un manœuvre algérien qui, ne trouvant nulle part de travail, finit par échouer à Modane, où le chantier du barrage a besoin de bras. Mais, il n'en a besoin que pour combler les vides laissés par les accidentés. Justement, un homme vient de se tuer en tombant d'un plot. Alors, l'Algérien monte au barrage, pris au passage dans sa jeep par l'ingénieur au grand cœur.

Il y a aussi ce père de famille italien, qu'il va falloir renvoyer chez lui à cause de la silicose. C'est la misère pour sa nombreuse famille... et pourtant, l'Italie, c'est beau, lui dit Micheline.

« – Oui, Mademoiselle, c'est beau... quand on a de l'argent ! »

En partant définitivement, l'ingénieur croise un autre Algérien, qui monte lui aussi au barrage. On y a besoin d'un homme. C'est pour remplacer son compatriote, qui vient de se tuer accidentellement (Figure 7).

Le reportage dépasse le seul cadre du barrage de Plan d'Amont. Cette dernière scène montre en arrière-plan les ruines de Charles-Félix, l'un des forts sardes de la Barrière de l'Esseillon, construite vers 1830, dont la réhabilitation à des fins touristiques est aujourd'hui très avancée. A l'époque, c'était l'abandon total.

Le passage de l'ouvrier à cet endroit signifie qu'il vient de Modane par l'ancienne route qui, après la cascade Saint-Benoît, franchit la falaise par une impressionnante

corniche artificielle. Toujours praticable, elle est délaissée pour la route moderne, celle de la conduite forcée.



Figure 7 Dans un café de Modane : au comptoir, Gérard Philipe et Gérard Oury; Olivier Hussenot joue du violon. « Il est interdit de jouer à la morra ». La danseuse n'est pas identifiable au générique. La scène fut tournée en studio avec des accessoires empruntés sur place.

Au-delà des court-métrages documentaires proposés par EdF, ce film « constitue à ce jour un témoignage unique de ce que fut l'épopée française des grands barrages [16]. »

5. Une époque, un état d'esprit

Il n'est pas aisé de se replacer aujourd'hui dans l'atmosphère d'une époque, celle de l'après-guerre, qui paraît tellement lointaine. Pour l'équipement énergétique, « l'enthousiasme reconstruteur était d'autant plus ferme qu'il trouvait un exutoire dans la réalisation des plans de 1938 et de 1941, malencontreusement reportés en raison du conflit. De nombreux projets grandioses existaient dans les cartons [...] La reconstruction était fondée sur un schéma dans lequel l'hydraulique devait fournir plus de la moitié de l'énergie électrique (55 %) et où le charbon n'intervenait que pour 35 % [17]. »

Cet immense programme concernait également l'Algérie, dont le développement était tributaire de l'hydraulique aussi bien pour les cultures que pour l'énergie. « La construction de ces barrages s'est heurtée à des difficultés que l'on n'avait rencontrées nulle part ailleurs, difficultés ayant essentiellement pour origine la très mauvaise qualité des terrains et le régime fort irrégulier des oueds. [...] La solution de ces difficultés n'a pu être obtenue qu'à coup d'innovations et de hardiesses, mais aussi de... millions [18]. »

L'aventure littéraire de Philippe Gillet, menée concurremment avec son parcours d'ingénieur, puis de chef d'entreprise, vint de son indignation face à une injustice :

« Chaque fois que je revenais à Paris de mon barrage d'Iril-Emda, j'étais scandalisé de constater que le public français ignorait totalement ce que nous faisons sur nos lointains chantiers, où de jeunes ingénieurs travaillaient cependant comme des fous et accomplissaient des exploits [19]. »

D'où cette idée d'initier le public à un milieu professionnel méconnu, en exaltant les valeurs du travail plutôt que la fiction ou même le fait-divers. Le choix de la forme romanesque donnait une liberté de transposition et permettait de toucher un public non spécialisé, que des descriptions plus fouillées eussent rebuté. La mise en pratique de cette idée n'allait cependant pas de soi :

« Une cantine perdue au fin fond de la Kabylie, quatre ingénieurs du même âge que moi : 25 ans, autour d'une table éclairée par une ampoule nue. Personne n'a envie d'aller se coucher et je dis qu'il y aurait un roman à écrire sur ce qu'on fait ici. J'entends encore la tempête de rigolade ayant accueilli cette idée farfelue [20]. »

Ce livre fut réédité en 1956, à l'occasion de la sortie du film. C'est la même année que parut l'autre roman africain de l'auteur, *La machine à faire des dieux* : « Laffont allait l'accepter sans hésitation, l'estimant autrement mieux écrit que *La meilleure part*... En fait, en dépit d'une excellente critique ce fut, commercialement, un bide [21]. » Il fut écrit à Ismaïlia, où son entreprise l'avait envoyé travailler à la consolidation des berges du canal [22]. Le thème rejoint dans une certaine mesure le précédent, puisque le personnage central est un jeune ingénieur en poste à Douala, au Cameroun. Toutefois, plutôt qu'une immersion dans un milieu professionnel, c'est bien davantage une double aventure, amicale et sentimentale. Le personnage central rencontre sa future épouse dans le petit cercle des Blancs vivant entre eux, soumis à l'épreuve constante du climat équatorial : « A Douala, les pluies, dont la hauteur dépasse 4 mètres par an, sont à peu près constantes et l'humidité y est considérable [23]. » Ce livre transpose l'histoire personnelle de l'auteur [24]. Son aventure africaine évoque celle de Odile et Pierre Merlin au Sénégal [25].

Le même procédé littéraire est repris dans *L'île d'acier*, mi-roman, mi-reportage sur la vie à bord d'une plate-forme de forage en mer. L'auteur montre le mérite et les épreuves de ces équipages méconnus grâce auxquels coule le pétrole (Figure 8).

Pour le film, c'est le producteur qui pressentit Saint-Gil par l'intermédiaire de l'éditeur Robert Laffont. Il venait de produire *La bataille de l'eau lourde*, dans la veine des films d'après-guerre consacrés à des épisodes de celle-ci, et voulait tourner un film sur un grand chantier de barrage. Il s'était assuré le concours d'Yves Allégret et de Gérard Philipe, qui revenaient du Mexique où ils avaient tourné *Les Orgueilleux* sous la direction de H-G Clouzot [26].

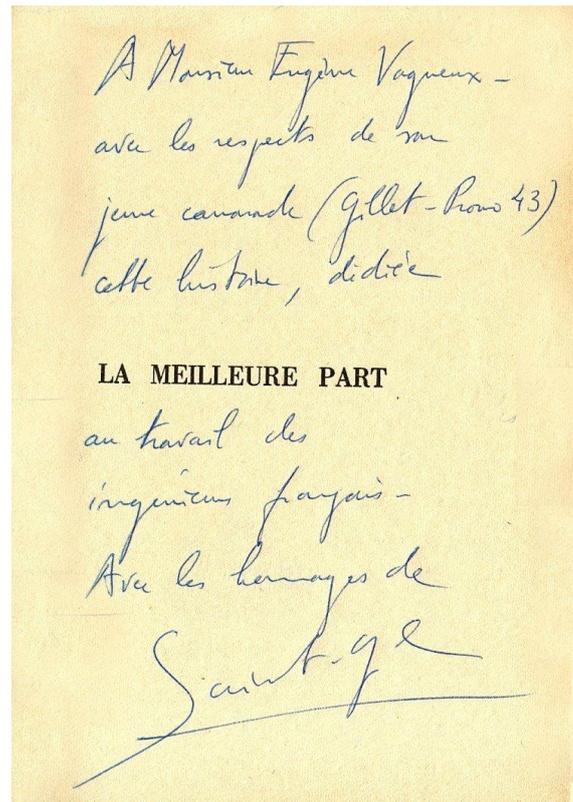


Figure 8 Une dédicace à M. Eugène Vagueux, qui inventa la traverse bibloc en béton alors qu'il était Ingénieur-en-chef du réseau PLM ; il fonda en 1923 la SATEBA pour exploiter ses brevets.

Le metteur en scène avait fondé sa réputation au lendemain de la guerre avec sa « période Simone Signoret », à laquelle succéda une carrière en dents de scie. Chronologiquement, *La meilleure part* s'y trouve entre *Mam'zelle Nitouche* (1955) et *Méfiez-vous fillettes* (1957), avec Robert Hossein et Antonella Lualdi.

« Le cinéaste est pour les barrages, le plan, l'avenir qui sourit aux hommes (*La meilleure part*), mais dans quelle mesure croit-il vraiment à ces vues et peut-il y croire, du plus profond de sa sensibilité [27] ? »

Des critiques ont comparé ce film à *Si tous les gars du monde*, celui de Christian-Jaque sorti en 1955, qui connut un grand succès. C'est l'histoire d'une chaîne de solidarité internationale, en pleine guerre froide, pour sauver l'équipage d'un chalutier. Il existe une similitude de thème : un milieu professionnel très spécialisé, l'isolement et une vision optimiste du monde. Mais, ce qui est une situation exceptionnelle dans l'un est une routine dans l'autre. Pour J. Chevallier, les différences sont fondamentales :

« Il y a en particulier, dans *La meilleure part*, la volonté affirmée de traiter un problème, d'exposer une situation. Ce film a l'ambition de réunir sous nos yeux toutes les données sociales, morales et psychologiques de la vie d'un groupe de bâtisseurs, techniciens et ouvriers manuels. Cette description s'attache à en retenir les aspects les plus

significatifs, mais aussi les plus quotidiens : de là son caractère profondément réaliste [28]. »

Enfin, il est une dernière approche qui permet d'appréhender le livre et le film selon une vision plus large, celle du remodelage de la nature à des fins de civilisation.

« Du point de vue économique, quel qu'ait pu être l'effort accompli dans le passé, l'Algérie est à ce jour un pays pauvre eu égard à l'importance de sa population et au rythme d'accroissement de celle-ci. La mise en valeur par l'eau constitue ici, non seulement la manifestation de la tendance normale d'un pays moderne vers un mieux-être collectif, mais aussi et surtout une nécessité impérative et inéluctable [29]. »

L'humble ouvrier algérien qui monte de Modane vers le chantier et y laisse sa vie apparaît à cet égard comme un trait d'union symbolique, les barrages d'Iril Emda et de Plan d'Amont étant ainsi réunis sous le nom du mythique Ali Médir.

Remerciements

L'auteur exprime sa gratitude à : Monsieur Eloi Chardonnet, ancien chef du service Etudes, région EdF Alpes II, Monsieur Pierre Blancher, Directeur de Projet Energie Hydroélectrique Beaufortain – Val d'Arly, Madame Françoise Bourrigault et la rédaction de *La Jaune et la Rouge*, Madame Germaine Col, témoin oculaire du tournage.

Recherches bibliographiques effectuées pour partie à l'Ecole nationale supérieure des mines de Paris et à la Société Hydrotechnique de France.

Bibliographie

- [1] Voir GUERNIER (E.), ed., *L'encyclopédie coloniale et maritime / Algérie et Sahara*, Paris, Encyclopédie de l'Empire français, II, 1948, 384 p. (p. 108 et 116-118)
- [2] LAMBERT (A.), « Eléments de technogéologie des barrages algériens – Le barrage d'Iril Emda », XIXe Congrès géologique international, Alger, 1952, 8 p.
- [3] DROUHIN (G.), « L'équipement hydraulique de l'Algérie », Alger, Congrès de l'Industrie et du Commerce, conférence du 22 avril 1948, avec textes annexes. En ligne sur le site www.alger-roi.net/Alger/documents_algeriens/economique/pages/110_amenagements_hydroelectriques.htm
- [4] GAUTIER (M.), « La géologie et les problèmes de l'eau en Algérie – Données générales sur ces problèmes », Alger, XIXe Congrès géologique international, 1952, 20 p.
- [5] VARLET (H.), *Aménagement, utilisation et prix de revient des usines hydrauliques*, Paris, Eyrolles, 1961, 211 p. (p. 101 et 119).
- [6] CHABERT (J.), « De l'utilisation du phénomène d'injection dans un évacuateur de crues – Application au barrage de l'Iril Emda », *La Houille Blanche*, n° spécial A/1952.
- [7] La technique du béton bitumineux, mélange de bitume et de minéraux de différentes granulométries, est décrite à propos du barrage du Ghrib dans : MARTIN (M.R.), « Les

grands barrages et les irrigations en Algérie », Alger, Edition de chantiers, sd, 30 p.

[8] GUERNIER (E.), ed., *L'Encyclopédie coloniale et maritime – Algérie et Sahara*, II, Paris, Encyclopédie de l'Empire français, 1948, 394 p. (p. 101)

[9] BARJOT (D.), « Truchetet & Tansini – L'itinéraire d'une PME spécialiste des grands barrages (1921-1976) », dans JOLY (H.) et al., eds., *Des barrages, des usines et des hommes*, Presses Universitaires de Grenoble, 2002, 386 p.

[10] SAINT-GIL (P.), *Le barrage*, Paris, Laffont, collection Plein Vent, 1969, 250 p.

[11] La comédienne Michèle Cordoue (1920-1987), à la ville Andrée Louise Marie Bonnet, était alors l'épouse de Yves Allégret (1905-1987) après avoir été celle de Henri Vidal. Sa carrière fut brève, de 1952 à 1962, avec des seconds rôles. Elle est ici l'infirmière Micheline : « Naturellement, elle est blonde... et elle est blonde naturellement » eût dit Sacha Guitry.

Le tournage, retardé à la suite du décès accidentel du fils d'Yves Allégret à Epierre alors qu'il devait jouer dans le film, débuta à fin juillet 1955 (témoignage de Mme Germaine Col). Le film fut achevé au printemps suivant (journaux de cinéma de juin) et le barrage en septembre 1956.

[12] ORTH (J.) et MOUCHET (A.), « Le barrage de Plan d'Amont – Aménagement d'Aussois », *Travaux*, 286, 1958

[13] DULUC (A.), *Le Mont Cenis – sa route, son tunnel*, Conservatoire National des Arts-et-Métiers, XLIII Mémoires et travaux, Paris, Hermann et Cie, 1952, 151 p.

Le site du chantier du tunnel n'est qu'à une dizaine de kilomètres de Plan d'Amont. Pour les questions techniques, voir : *Mémento des mines*, Paris, Régie publicité industrielle, 1968, 554 p.

La foration à l'explosif fut de nouveau utilisée dans les années 1970 pour le tunnel routier du Fréjus, de préférence au tunnelier.

[14] COL (G.), « Souvenirs d'une cantinière – Aussois – Roselend », *L'Histoire en Savoie*, Société savoisienne d'histoire et d'archéologie, 112, décembre 1993, « Barrages de Savoie ». Cette galerie fut mise en service en 1959 (archives EdF).

[15] Voir MAURIN (G.) ed., *Histoire du service de la production hydraulique d'Electricité de France 1946-1992*, Paris, AHEF, 1995, 640 p. (p. 178)

[16] BARJOT (D.), *op. cit.*

[17] MORSEL (H.), ed., *Histoire générale de l'électricité en France*, III, Paris, AHEF, Fayard, 1996, 1196 p. (p. 326)

[18] GUERNIER (E.), *op. cit.* (p. 100)

[19] PILÉ (G.), « L'ingénieur-écrivain – Entretien avec Philippe Saint-Gil », *La Jaune et la Rouge*, revue mensuelle de la Société amicale des anciens élèves de l'Ecole polytechnique, 505, 1995

[20] *La Jaune et la Rouge*, 460, 1990

[21] *La Jaune et la Rouge*, 505, 1995



[22] PRIEUR (P.) et GILLET (P.), « La protection des risbermes du canal de Suez par revêtements bitumineux », *Travaux*, 253 (nov. 1955) et 254 (décembre 1955).

[23] GUERNIER (E.) et FROMENT-GUIEYSSE (G.), eds., *Encyclopédie de l'Afrique française, Cameroun-Togo*, Paris, Editions de l'Union française, 1951, 583 p. (p. 1)

[24] VALLIÈRES (C.), *Ce toit fragile où veillent les vautours*, 2 vol., Paris, Flammarion, 1984, 337 et 375 p.

[25] MERLIN (P. et O.), *Ingénieur en Afrique 1938-1961 / Le chant des Filaos*, Paris, Karthala, 2005, 227 p.

[26] Saint-Gil et Philipe avaient alors l'un et l'autre 29 ans. La vedette féminine des *Orgueilleux* (1953) était Michèle Morgan.

[27] BOUSSINOT (R.), *L'encyclopédie du cinéma*, Paris, Bordas, 1967, 1550 p.

[28] CHEVALLIER (J.), dans *Image et Son*, 93, juin 1956. Voir également *Mon film*, 513, juin 1956, et *Les films pour tous*, 276, mars 1962. Citons aussi le court-métrage « Opération béton », réalisé par Jean-Luc Godard en 1953 lors de la construction du barrage de la Grande Dixence, en Suisse.

[29] GAUTIER (M.), *op. cit.*



Un exercice sur les volants d'inertie

Nicolas MAGDELAINE

Professeur de Physique appliquée ; nicolas.magdelaine@ac-nantes.fr

Résumé : un exercice sur les volants d'inertie, largement inspiré de l'article écrit par H. BEN AHMED, B. MULTON, N. BERNARD et C. KERZREHO intitulé « le stockage inertiel électromécanique », paru dans la revue 3EI n°48 de mars 2007.

1. Introduction

L'énergie cinétique W_c (en **J**) d'un corps de masse m (en **kg**), animé d'une vitesse v (en **m/s**) est :

$$W_c = \frac{1}{2} m v^2.$$

➤ Calculez, (en **J** puis en **W.h**), l'énergie cinétique d'un poids lourd de 15 tonnes roulant à 80 km/h.

Une masse ponctuelle suit un mouvement circulaire de rayon R (en **m**) à une vitesse angulaire Ω (en **rad/s**).

➤ Exprimez la vitesse linéaire v (en **m/s**) de la masse en fonction de R et Ω .

➤ Exprimez alors W_c en fonction de m , R et Ω .

Pour une masse, d'inertie J (en **kg.m²**), en rotation autour d'un axe à la vitesse angulaire Ω (en **rad/s**), on donne l'expression de l'énergie cinétique (en **joules J**) $W_c = \frac{1}{2} J \Omega^2$.

➤ A l'aide de l'expression que vous venez d'établir, exprimez l'inertie J en fonction de m et de R .

L'inertie, notée J , nous indique si l'accélération, le freinage ou le changement de direction d'un solide nécessite un effort important (J élevé) ou minime (J faible).

L'inertie J d'un solide dépend de sa masse mais aussi de la répartition de celle-ci par rapport à l'axe de rotation.

Pour exemple, prenez un marteau, tête en main, et faites-le pivoter. Recommencez l'expérience en prenant le marteau par le manche...

2. Capacité énergétique d'un volant

Afin d'obtenir un système de stockage d'énergie, on réalise un volant en forme de cylindre plein à partir d'une masse M d'un acier haute résistance. L'inertie J (en **kg.m²**) d'un cylindre plein de rayon R (en **m**), de hauteur h et de masse M (en **kg**) est $J = \frac{1}{2} MR^2$.

On cherche à maximiser l'énergie cinétique stockée $W_c = \frac{1}{2} J \Omega^2$.

- Si le rayon R du cylindre est multiplié par 2, dans quelle proportion varie son inertie J ?
- Quel profil privilégier pour augmenter l'inertie (et donc à Ω donnée, augmenter l'énergie W_c stockée) ?

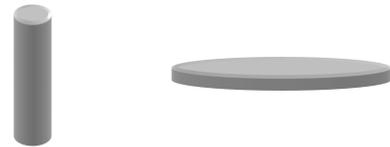


Figure 1 : Quel profil maximise l'inertie J du cylindre ?

Chaque partie du cylindre tourne à la même vitesse angulaire Ω . Cependant les parties les plus éloignées du centre ont une vitesse tangentielle plus élevée que les parties centrales. Les parties périphériques du cylindre, allant à une vitesse plus élevée, sont soumises à des efforts mécaniques plus importants. Chaque matériau est alors caractérisé par une vitesse limite V_{plim} au-delà de laquelle le cylindre subirait des déformations irréversibles pouvant mener à la destruction du volant.

➤ Exprimez Ω_{lim} , la vitesse angulaire limite, en fonction de V_{plim} et de R .

Si l'inertie J peut être augmentée en jouant sur le profil du cylindre, la vitesse angulaire ne peut être augmentée indéfiniment, fixant ainsi une énergie stockée limite $W_{c_{lim}} = \frac{1}{2} J \Omega_{lim}^2$.

- Quand le rayon est multiplié par 2, dans quelle proportion varient :
 - L'inertie J du cylindre ?
 - La vitesse angulaire limite Ω_{lim} ?
 - L'énergie stockée limite $W_{c_{lim}}$?
- Quand le rayon est divisé par 2, dans quelle proportion varient :
 - L'inertie J du cylindre ?
 - La vitesse angulaire limite Ω_{lim} ?
 - L'énergie stockée limite $W_{c_{lim}}$?
- Exprimez $W_{c_{lim}}$ en fonction de M et V_{plim} .
- Concluez sur le choix du profil maximisant l'énergie stockée.



L'expression précédente montre que l'énergie limite que peut stocker un volant dépend du matériau utilisé (définissant V_{plim}) et de sa masse M mais pas du profil du cylindre. On définira donc, pour chaque matériau, une **énergie massique** et/ou une **énergie volumique** dans les **conditions limites** d'utilisation.

On a $W_{clim} = \frac{1}{4} M \cdot V_{plim}^2 = \frac{1}{4} \rho \mathcal{V} \cdot V_{plim}^2$ où \mathcal{V} est le volume du cylindre en m^3 .

Pour un cylindre plein d'un acier haute résistance (35NiCrMo16), on donne la vitesse périphérique limite de $V_{plim} = 520$ m / s. La masse volumique de cet acier est $\rho = 7800$ kg / m^3 .

➤ Calculez l'**énergie volumique limite** (W_{clim} / \mathcal{V}) d'un volant d'un tel acier en J/m^3 puis en $W.h/litre$.

Afin de s'assurer que le volant fonctionne hors de la zone de rupture, on fixe, pour la vitesse maximale, la marge de sécurité suivante : $V_{pmax} = V_{plim} / \sqrt{2}$.

- Exprimez l'**énergie volumique maximale** (W_{cmax} / \mathcal{V}) en fonction de l'énergie volumique limite.
- Calculez-la.

3. Dimensionnement de l'ensemble Convertisseur – Machine – Volant

L'énergie cinétique stockée par le volant sera prélevée et restituée à un réseau électrique. Ainsi, le volant est solidaire d'une machine électrique pilotée par un convertisseur d'électronique de puissance.

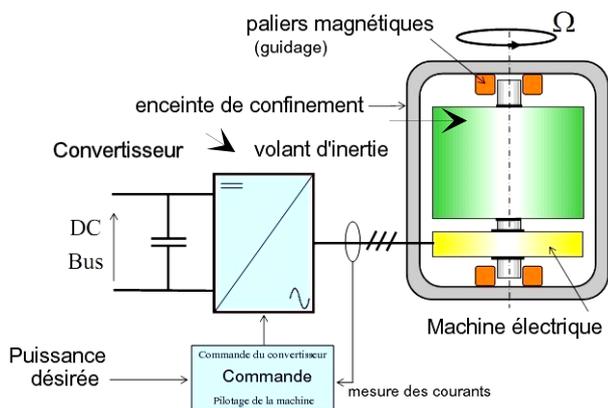


Figure 2 : topologie du système de stockage.

En **charge**, le convertisseur pilote la machine électrique de sorte qu'elle fonctionne en **moteur**, le volant est **accélééré**, il emmagasine donc de l'énergie.

En **décharge**, le convertisseur pilote la machine électrique de sorte qu'elle fonctionne en **générateur**, le volant est **freiné**, l'énergie est restituée au réseau électrique.

On dimensionne l'ensemble comme suit :

- Le volume du volant détermine (pour un matériau donné) la capacité énergétique W_{cmax} (cf. partie 2).
- On choisira la constante de temps τ , en fonction du type de besoin : τ petit pour des appels répétés de puissance, τ grand pour assurer l'autonomie. On donne $\tau = W_{cmax} / P_{max}$ (τ en s, W en J et P en W).
- La taille du convertisseur électronique augmente avec la puissance maximale P_{max} qui y transite.
- Le rayon R du volant fixe la vitesse de rotation maximale Ω_{max} (cf. partie 2).
- Enfin, la taille de la machine augmente avec le couple C (en **N.m**) = P_{max} / Ω_{max} .

On cherche ici à dimensionner un volant ayant une capacité énergétique $W_{cmax} = 1$ kW.h. On utilisera un acier haute résistance (35NiCrMo16) dont l'énergie volumique maximale vaut 75 Wh / litre.

➤ Déterminez le volume \mathcal{V} du volant cylindrique ayant la capacité énergétique désirée.

A partir d'une même énergie stockée, on veut dimensionner un système en énergie et l'autre en puissance. On donne $\tau_1 = 1$ min et $\tau_2 = 1$ h.

➤ Indiquez le numéro du système dimensionné en énergie, et de celui dimensionné en puissance.

➤ Calculez dans chaque cas la puissance maximale que doit pouvoir délivrer le convertisseur.

➤ Calculez pour les rayons $R_1 = 5$ cm et $R_2 = 15$ cm, la hauteur de cylindre correspondante.

On donne la vitesse tangentielle maximale pour ce matériau : $V_{pmax} = 360$ m / s.

➤ Calculez pour les rayons R_1 et R_2 de cylindre la vitesse angulaire maximale associée.

➤ En procédant comme ci-dessous, déterminez, pour chaque transition de la figure n° 3, les variations (\nearrow , \searrow ou $=$) des grandeurs indiquées.

- En observant le convertisseur, on déduit la variation P_{max} et donc celle de τ .
- En observant le volant, on voit la variation de R , on en déduit alors celle de Ω_{max} .
- Des deux variations précédentes, on déduit la variation de $C = P_{max} / \Omega_{max}$, ce qui permet de choisir la taille de la machine parmi les suivantes :



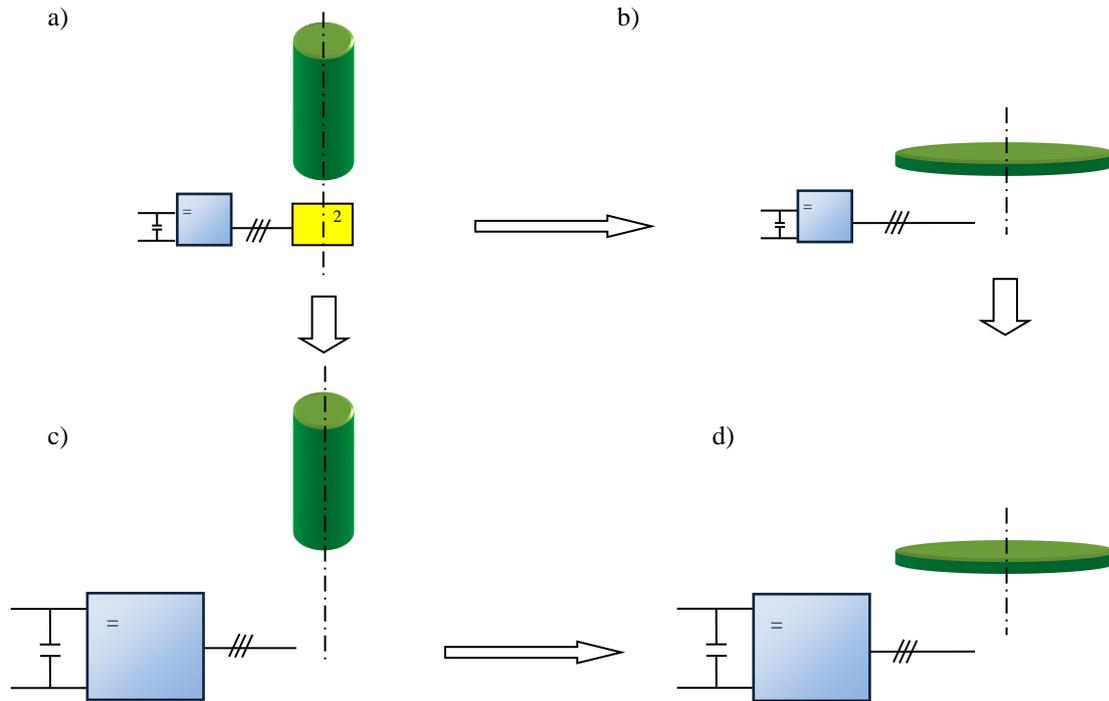


Figure 3 : Choisissez la taille de la machine électrique qui convient.

- Déterminez alors parmi ces figures celles qui peuvent correspondre aux systèmes 1 et 2.

4. Etude d'un cycle de charge - décharge

Une des caractéristiques de la machine est la plage $[\Omega_{min}; \Omega_{max}]$ sur laquelle celle-ci peut travailler à puissance maximale.

Exprimez la profondeur de décharge du volant d'inertie $PDC = (W_{cmax} - W_{cmin}) / W_{cmax}$ en fonction de $r = \Omega_{max} / \Omega_{min}$.

- Calculez la PDC pour $r = 2$ et pour $r = 3$.

Le système est dimensionné comme suit :

$$W_{cmax} = 1 \text{ kW.h} \quad \text{et} \quad \tau = 1 \text{ h.}$$

- Calculez la puissance maximale qui doit pouvoir transiter par le convertisseur.

On étudie un cycle de charge - décharge se faisant à puissance maximale P_{max} .

Avec la convention générateur, on a $\Delta W = - P \cdot \Delta t$ (ΔW en **W.h** avec P en **W** et Δt en **h**)

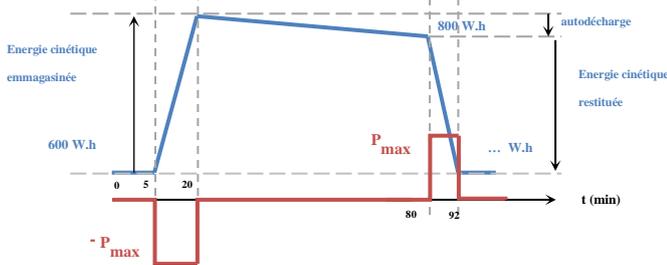


Figure 4 : cycle charge - décharge à P_{max} .

- Calculez ΔW_{ce} , l'énergie cinétique emmagasinée et déduisez-en l'énergie stockée par le volant à l'instant $t = 20$ min.
- Calculez ΔW_{cr} , l'énergie cinétique restituée et déduisez-en l'énergie stockée par le volant à l'instant $t = 92$ min.

Le phénomène d'autodécharge (ralentissement du volant dû aux frottements) ne permet pas de restituer intégralement l'énergie cinétique emmagasinée.

- Exprimez puis calculez le rendement η_v du volant sur le cycle charge-décharge.
- Calculez en % / heures les pertes d'autodécharge.
- Comment doit-être l'inertie du cylindre (faible ou élevée) pour minimiser ce phénomène ?

Afin de réduire les pertes d'autodécharge, on diminue les frottements grâce à un guidage par suspension magnétique et l'enceinte de confinement est sous vide pour limiter les frottements de l'air.

On cherche finalement à calculer le rendement du système volant - machine - convertisseur.

L'ensemble machine-convertisseur a un rendement η_{m-c} de 90 % en charge comme en décharge.

- Sur le cycle charge - décharge étudié, exprimez en fonction de η_{m-c} et de η_v , le rendement η du système.
- Calculez le rendement η .



Simulation et mise en œuvre pratique d'un convertisseur AC-DC monophasé à prélèvement sinusoïdal

Mickael PETIT, Elisabeth RULLIERE, Marc BRUNELLO

Ecole Nationale Supérieure de l'Energie, de l'Eau et de l'Environnement (ENSE³)

BP 46

38402 SAINT MARTIN D'HERES Cedex

Résumé : cet article présente la démarche proposée aux futurs ingénieurs de la filière Ingénierie de l'Energie Electrique (IEE) au sein de l'Ecole ENSE³ en vue de la réalisation d'un redresseur à absorption sinusoïdale. Après avoir été sensibilisés à la notion de prélèvement sinusoïdal au travers d'un cours magistral exposant ensuite les diverses méthodes possibles pour y parvenir, les étudiants se voient proposée l'étude en simulation d'un redresseur monophasé du type pont complet de diodes sans et avec absorption sinusoïdale du courant de ligne, sans et avec régulation de la tension de sortie par l'intermédiaire d'un hacheur Boost correctement commandé. Cette simulation doit permettre d'appréhender non seulement le fonctionnement du montage avec sa commande ainsi que son dimensionnement mais aussi l'influence des différents paramètres tels inductance de ligne, résistance de charge... Dans un deuxième temps, nous fournissons aux élèves la maquette d'un redresseur à absorption sinusoïdale dont le dimensionnement est identique à celui étudié en simulation ; ils doivent d'abord réaliser une partie de la commande sous la forme d'une carte électronique (asservissement du courant de ligne, asservissement de la tension de sortie); ils observent ensuite les différents signaux en entrée et en sortie du montage pour les comparer à ceux obtenus en simulation et les interpréter.

1. Introduction

L'enseignement d'électronique de puissance en 2^{ème} année de la filière IEE se fait au travers d'un cycle de 20h00 de Cours Magistral, de 12h00 de Travaux Dirigés et de 27h00 de Bureaux d'Etudes-Travaux Pratiques. L'objectif est de familiariser les étudiants avec les principales structures de conversion Continu-Continu [1], Continu-Alternatif [2] et Alternatif-Continu [3] et de les sensibiliser au sujet incontournable aujourd'hui de la pollution des réseaux d'alimentation qu'engendrent les convertisseurs. Dans le cadre d'un cours magistral, de 2h00, nous présentons d'abord deux applications industrielles intégrant un ou plusieurs ponts de diodes monophasés ; en petite puissance il s'agit d'une alimentation continue pour ordinateur portable et en forte puissance nous prenons l'exemple de l'alimentation des moteurs d'une locomotive BB15000. Après l'observation des formes d'onde du courant absorbé et des spectres correspondants, nous évoquons les normes CEM [4] mises en place pour limiter les harmoniques et les moyens à mettre en œuvre pour y parvenir [5] : structure à un étage pour laquelle le convertisseur intègre à lui seul l'absorption sinusoïdale et structure à deux étages où un convertisseur supplémentaire est introduit pour réaliser cette fonction. Nous détaillons plus particulièrement le cas de la structure à étages intercalant un hacheur de type Boost entre le pont redresseur et la charge en détaillant deux types de commande pour asservir le courant d'entrée à un courant sinusoïdal en phase avec la tension réseau. C'est cette dernière dont nous présentons l'étude en simulation, avec un contrôle par hystérésis du courant

absorbé seul ou avec une régulation de la tension aux bornes de la charge. La réalisation pratique de cette même structure est proposée au semestre suivant, c'est-à-dire en début de 3^{ème} année, aux étudiants de la filière qui ont choisi le parcours métier « Electronique de Puissance et Traitement de l'Energie ». Une maquette intégrant le pont de diodes et le hacheur Boost est fournie; les étudiants doivent réaliser la carte électronique qui élabore le signal de commande de l'interrupteur MOS du hacheur Boost en assurant dans un premier temps le contrôle par hystérésis du courant seul puis avec la régulation de la tension de sortie. Du point de vue volume horaire, le temps passé par les étudiants se répartit équitablement entre l'étude en simulation et l'étude pratique pour une durée totale de 16h00.

Du fait de la complexité croissante des techniques modernes, le processus de développement et de contrôle des produits devient lui aussi de plus en plus complexe : les outils de simulation sont alors indispensables lors de leur conception. Par conséquent, il est fondamental que cette démarche soit appréhendée par un futur ingénieur, notamment dans le domaine de l'électronique de puissance. Nous faisons d'ailleurs en sorte que l'étudiant soit plusieurs fois confronté à cette démarche, non seulement au travers de Bureaux d'Etudes comme celui que nous présentons dans cet article mais aussi dans le cadre de mini projets qu'ils mènent en 3^{ème} année à raison d'une journée par semaine pendant 10 semaines.

Dans une première partie, nous exposons l'étude proposée en simulation, dans une deuxième partie, nous



détaillons la maquette permettant l'étude pratique du montage, les réalisations demandées aux étudiants ainsi que les résultats obtenus confrontés à ceux issus de la simulation.

2. Etude en simulation d'un redresseur monophasé avec prélèvement sinusoïdal

Nous proposons l'utilisation du logiciel PSim commercialisé par la société PowerSim [6], dédié à l'électronique de puissance ; il est en effet très facile à prendre en main du fait d'une grande convivialité et convient bien pour une première approche, la contre partie étant évidemment un nombre limité de possibilités relatives à la modélisation des éléments par exemple.

1.1 Alimentation continue réalisée par pont de diodes seul

La première étape consiste à construire et à simuler l'alimentation en continu d'une charge modélisée par un circuit R-C parallèle ($R = 60\Omega$ et $C=0.94 \text{ mF}$) à partir d'un réseau monophasé lui-même modélisé par un générateur de tension alternative :

$v(t) = V_m \sin \omega t$, avec $\omega = 2\pi \times 50 \text{ rad/s}$ et $V_m = 136\text{V}$ et une inductance de ligne $L=600\mu\text{H}$. Un simple pont de diodes permet de redresser la tension secteur. La figure 1 précise le montage assorti d'appareils de mesure permettant la visualisation des diverses grandeurs intéressantes à visualiser.

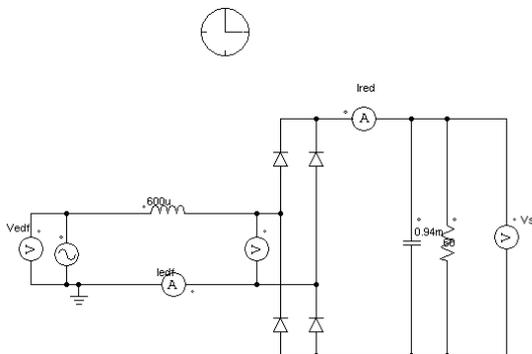


Figure 1 : Redresseur monophasé en pont sur charge R-C

Le simulateur a besoin d'une référence de potentiel unique pour tout le circuit: « Ground », il faut donc en connecter une sur le circuit de puissance. Il faut penser à paramétrer la simulation à l'aide d'une commande « Simulation control » préalablement placée sur le schéma (horloge).

Lors de la préparation du Bureau d'Etudes, il est demandé aux étudiants de représenter le courant de ligne, la tension réseau ainsi que la tension aux bornes de la charge en supposant que la conduction est de type **discontinue**, que $RC \gg T$, $T = 20 \text{ ms}$ et en approximant après justification la durée de décharge à $T/2$. Les tracés doivent être justifiés par des équations simples. Il est également demandé de

calculer l'ondulation de la tension de charge : ΔV_s .

$$\Delta V_s \cong \frac{V_m T}{2 RC}$$

Lors du BE, les étudiants doivent faire la simulation et confronter les formes d'ondes obtenues celles prévues par la théorie, ils doivent mesurer la valeur moyenne du courant dans la charge, de la tension à ses bornes et vérifier la cohérence de leurs mesures, de même pour ΔV_s . En utilisant la fonction FFT (Fast Fourier Transform), ils visualisent les spectres des grandeurs, concluent et vérifient la cohérence en terme de puissance d'entrée et de sortie du montage. La figure 2 donne le résultat d'une telle simulation

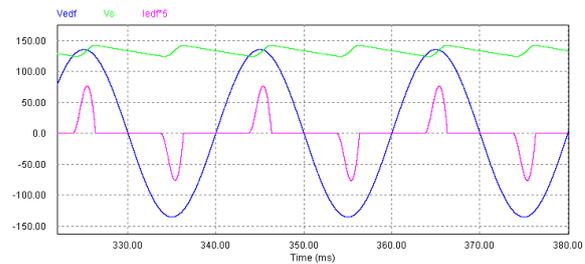


Figure 2 : Allure des tensions source et charge et du courant de source.

Les mesures en simulation donnent pour les valeurs moyennes des tension et courant de charge :

$V_s = 324.2\text{V}$ et $I_s = 6.85 \text{ A}$; le rapport $V_s / I_s = 47.3 \Omega$ n'est donc pas très différent de 50Ω .

Pour ce qui est des puissances, on a côté charge:

$$P_s = 324.2^2 / 50 = 2102 \text{ W}$$

Côté alimentation : $P_{\text{source}} = V_{I_F} \cos \phi_F$ avec I_F , la valeur efficace du fondamental du courant de source et ϕ_F le déphasage entre le fondamental du courant de source et la tension réseau ; on a quasiment $\phi_F = 0$; à l'aide du relevé du spectre du courant de source par le biais de la fonction FFT, on mesure $I_{F_{\text{max}}} = 12.95\text{A}$, soit : $I_F = 9.16\text{A}$ et donc :

$$P_{\text{source}} = 229.84 * 9.16 = 2105\text{W}$$

pratiquement égale à P_s . Les puissances en entrée et en sortie de montage sont bien du même ordre.

On mesure $\Delta V_s = 11.9 \text{ V}$ et par la théorie, on a : $V_m T / 2RC = 13\text{V}$.

Au travers de toutes ces mesures, les étudiants apprennent notamment à utiliser les nombreuses fonctionnalités du logiciel PSim. Ils doivent absolument garder en tête la nécessité de vérifier la cohérence des résultats obtenus tant d'un point de vue qualitatif que d'un point de vue quantitatif, en étant conscient qu'en simulation, on obtient toujours un résultat pour lequel il est impératif de conserver un regard critique. Dans le même ordre d'idée, il est très important de sensibiliser les utilisateurs à l'importance du choix du temps de simulation et de celui du pas de calcul en fonction des diverses constantes de temps du système et de ce que l'on désire observer : régime transitoire ou permanent.



1.2 Alimentation continue réalisée par pont de diodes et hacheur Boost - absorption sinusoïdale

Dans un deuxième temps, il est demandé de mettre en place une absorption sinusoïdale du courant de ligne par l'intermédiaire d'un hacheur Boost correctement commandé, l'objectif étant d'avoir un courant sinusoïdal en phase avec la tension réseau. Il existe à priori 2 types de stratégie de commande du hacheur :

-celle à **fréquence fixe**, on parle alors de commande par modulation de largeur d'impulsion. Elle nécessite l'utilisation d'un correcteur délicat à régler.

-celle à **fréquence « libre »** (variable) appelée **commande par hystérésis** ou par fourchette. C'est donc celle-ci, plus simple, que l'on demande de mettre en œuvre. Le schéma donné dans l'énoncé du sujet est celui de la figure 3.

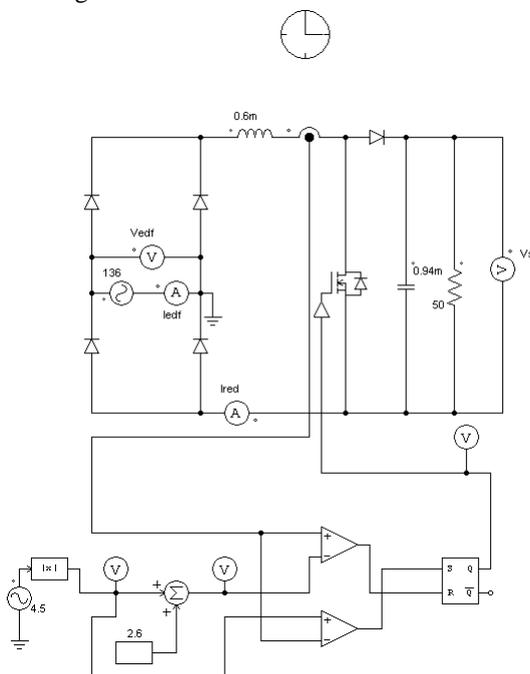


Figure 3 : Redresseur monophasé en pont+ hacheur Boost pour prélèvement sinusoïdal

Lors de leur préparation, les étudiants doivent préciser le rôle de chacun des éléments du montage de la figure 3. En particulier, il faut comprendre que la référence pour les 2 comparateurs est une image de la tension réseau que l'on redresse (bloc « valeur absolue »). La référence haute est obtenue en ajoutant une quantité donnée (sur la figure, elle vaut 1) à la référence basse, qui elle est égale à l'amplitude du générateur (4.5V sur la figure). Le capteur de courant (Ampères convertis en Volts) a un gain de 1.

La sortie du comparateur comparant le courant réel sur l'entrée + à la référence basse (entrée -) actionne l'entrée Set de la bascule RS ; la sortie du comparateur comparant le courant réel à la référence haute actionne l'entrée Reset.

L'interrupteur choisi pour le Boost est un MOSFET. Il faut prévoir un interface entre la commande et sa grille :

c'est le composant « On-Off controller » de PSim qui réalise cette fonction.

En choisissant une charge modélisée par $R=60\Omega$ et $C=0.94\text{ mF}$ et en supposant que **la conduction est continue**, il est demandé de calculer la valeur minimale que peut prendre V_s : c'est évidemment V_{EDFmax} . On peut en déduire le courant de ligne correspondant et cette valeur permet donc d'avoir un ordre de grandeur de la référence basse de courant (4.5A).

- La première simulation avec une inductance de ligne choisie égale à 0.6 mH (cf. figures 4, 5 et 6) permet une première approche quant à l'allure des courbes du courant en sortie du pont de diodes, de la tension réseau et de la tension de sortie en temporel et en fréquentiel. On vérifie que V_s est constamment supérieure à la tension réseau ; on constate que le courant de ligne varie bien entre les fourchettes basse et haute prévues, à une fréquence HF non constante et maximale d'environ 40 kHz tout au long d'une période BF (20ms) et on observe une distorsion au passage par zéro ; ces observations doivent être interprétées à l'aide d'un peu de théorie :

On peut montrer que le rapport cyclique du hacheur Boost peut s'écrire sous la forme :

$$\alpha(t) = 1 - \frac{V_M \sin \omega t}{V_s} + \frac{L\omega I_M \cos \omega t}{V_s}$$

et donc mathématiquement, au départ de chaque demi période du secteur, $\alpha(t) > 1$ pendant un certain temps ce qui est évidemment impossible physiquement.

α est donc égal à son maximum 1 et la vitesse de croissance du courant I_{red} est donc imposée par V_{red} et par L sans asservissement, d'où une déformation/distorsion du courant aux passages par zéro de la tension secteur.

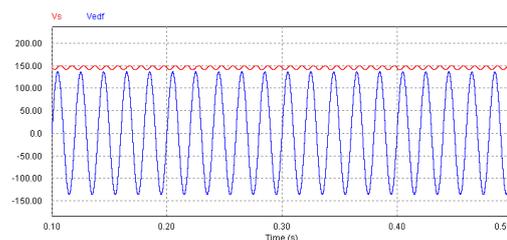


Figure 4 : Allure des tensions réseau et de sortie

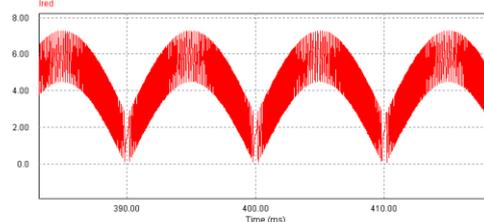


Figure 5 : Allure du courant en sortie du pont de diodes

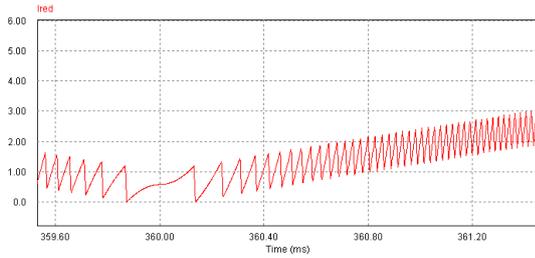


Figure 6 : Zoom du courant en sortie du pont au voisinage des passages par zéro

- L'étape suivante consiste à étudier l'influence des paramètres : inductance de ligne et écart ΔI entre les références haute et basse du courant en sortie du pont sur la fréquence maximale de découpage (HF). Ceci fait suite au travail demandé en préparation, à savoir établir la relation approchée suivante :

$$F_{HF} \cong \frac{(V_m \sin \omega t)(V_s - V_m \sin \omega t)}{4L\Delta I V_s} \quad (1)$$

où F_{HF} est la fréquence de découpage (HF) du courant redressé obtenue en exprimant les temps de conduction et de non conduction du MOS dont la somme représente $1/F_{HF}$.

Le maximum pour F_{HF} se trouve pour :

$$\sin \omega t = V_s / 2V_m$$

ce qui conduit à :

$$F_{HFmax} \cong \frac{V_s}{4L\Delta I} \quad (2)$$

Là encore, une des motivations majeures de cette étude est de faire prendre conscience au concepteur qu'il ne faut pas qu'il oublie les contraintes technologiques incontournables lors de la réalisation pratique du montage. Certes, en diminuant L ou ΔI , le courant redressé se rapproche plus d'une sinusoïde mais cela conduit à des fréquences HF maximales incompatibles avec un fonctionnement raisonnable pour le hacheur Boost : les pertes en commutation deviennent prohibitives ainsi que les surtensions aux bornes des interrupteurs dues aux inductances « parasites » que l'on ne peut évidemment minimiser à l'infini. Par exemple, en choisissant $\Delta I=2.6A$, on trouve une fréquence maximale de 23 kHz si $L=600 \mu H$ (par le calcul et en mesurant celle-ci sur les courbes obtenues) ce qui est tout à fait acceptable en terme de mise en œuvre pratique. Pour une inductance valant $300 \mu H$, soit 2 fois moins et en divisant ΔI également par 2, on obtient un courant mieux « lissé » mais la fréquence maximale atteinte est de 92 kHz ce qui est alors techniquement plus que délicat à réaliser.

- On peut également montrer par le calcul que le taux d'ondulation de la tension de sortie : $\Delta V_s / V_s$ dépend bien évidemment de C et de la puissance P transitée par le montage et le vérifier en simulation :

$$\Delta V_s / V_s = P / (C \omega V_s^2)$$

- Nous proposons également d'étudier grâce à la simulation l'influence de la charge R en faisant varier celle-ci. Si R augmente, V_s augmente et on est donc amené à la réflexion qu'un fonctionnement en circuit ouvert (R infinie) est évidemment inconcevable. Pour R faible, en dessous d'une valeur voisine de 46Ω (toujours calculable théoriquement), le hacheur passe en conduction discontinue lorsque V_s devient inférieur à V_{max} (cf figure 7).

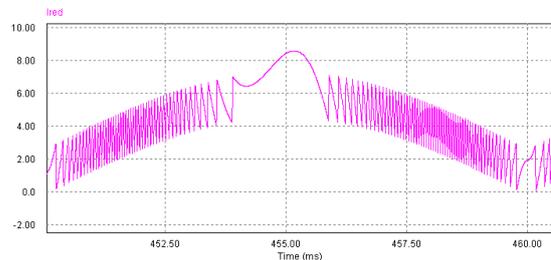


Figure 7 : Passage en conduction discontinue pour R=40 Ω

Une question intéressante à soulever est celle relative au déphasage de la référence de courant par rapport à la tension réseau. En effet, nous l'avons jusqu'ici réglée à 0 et donc la puissance réactive qui transite dans le montage est nulle. En conséquence, le montage est-il capable de transiter une puissance réactive non nulle en déphasant les deux grandeurs précitées ? La réponse est non : le courant de ligne lorsqu'il passe par zéro après avoir été positif ne peut devenir négatif puisque les diodes 2et 3 (cf. figure 8) continuent à être passantes. D'où la portion positive jusqu'à ce que les diodes 1 et 4 prennent le relais ; idem lors du passage par zéro après avoir été négatif ; ceci induit donc des discontinuités et donc des harmoniques (cf. figure 9), l'inverse du but recherché. Le montage n'est pas capable de fournir du réactif. Il faudrait rajouter des interrupteurs type MOS en parallèle sur les diodes pour permettre la réversibilité et donc un échange de réactif.

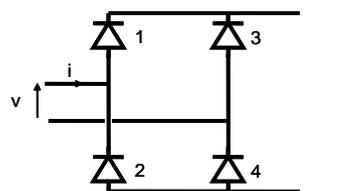


Figure 8 : Référencement des diodes du pont

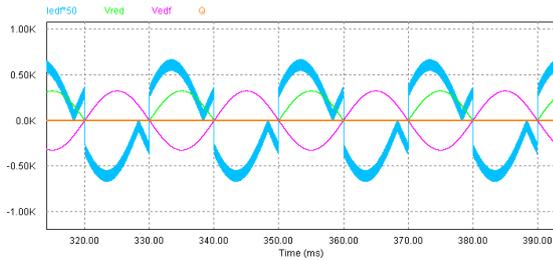


Figure 9 : Courant en sortie du pont, tension réseau, tension redressée en sortie du pont et puissance réactive

1.3 Alimentation continue réalisée par pont de diodes et hacheur Boost- absorption sinusoïdale du courant et régulation de la tension de sortie

On demande aux étudiants de compléter le schéma de simulation pour intégrer une régulation de la tension de sortie à l'aide d'un correcteur classique de type Proportionne Intégral. Le schéma devient donc celui de la figure 10. On remarquera la présence d'un gain de valeur numérique 0.01 au niveau du retour de tension, correspondant au capteur de ladite tension.

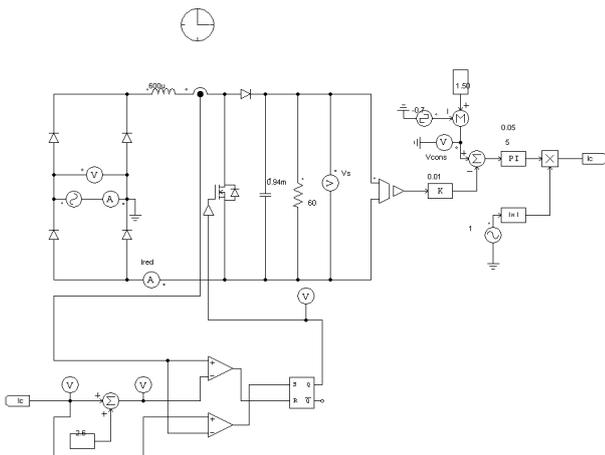


Figure 10 : Absorption sinusoïdale avec régulation de la tension de sortie

Dans un premier temps, il est demandé d'identifier le système avec absorption sinusoïdale du courant en boucle ouverte de tension. L'allure de la réponse (observation de la tension de sortie V_s) à un échelon de consigne d'amplitude 0.4V est donnée sur la figure 11 ; le système peut être assimilé à un premier ordre de constante de temps de 45ms (ce qui correspond au produit RC).

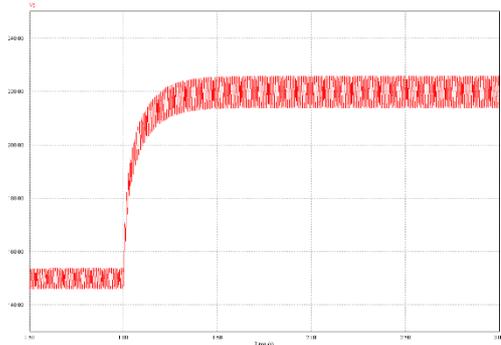


Figure 11 : Réponse du système à un échelon de consigne

Les paramètres du régulateur dont la fonction de transfert est mise sous la forme :

$$C(p) = K \frac{(1 + p\tau)}{p\tau}$$

sont les suivants : $K=7$ et $\tau=0.05$, choisis de manière à compenser la constante de temps du système en Boucle Ouverte et à obtenir un temps de réponse de 100 ms. La réponse ne doit pas être trop rapide. En effet, un échelon de consigne de tension à charge constante (asservissement) ou une variation de la charge du PFC à tension constante (régulation) impose une variation du courant. Cette variation, si elle est trop rapide, peut venir « polluer » le réseau d'alimentation. A contrario, si la réponse est trop lente, le PFC ne peut plus être vu comme une source de tension. Une réponse en 100ms (5 périodes du réseau 50Hz) semble être un bon compromis.

On peut ajouter une résistance supplémentaire en parallèle avec la charge et l'introduire à un instant réglable pour pouvoir simuler une perturbation de charge et ainsi observer la réponse en tension à celle-ci et mesurer le temps de réponse. La figure 12 illustre notre propos. Les étudiants peuvent ensuite modifier le réglage du correcteur pour en observer l'effet.

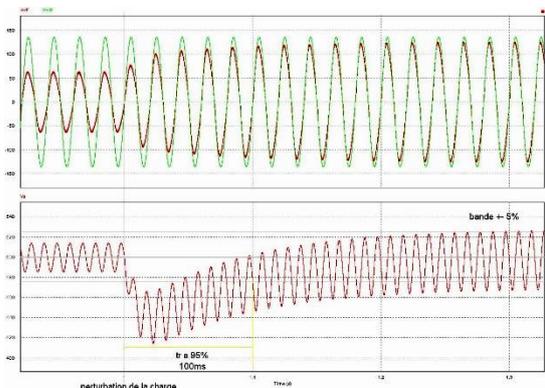


Figure 12 : Réponse en tension à une perturbation de charge et allure du courant redressé correspondant

2. Etude pratique d'un redresseur monophasé avec prélèvement sinusoïdal

2.1 Description de la maquette

La maquette sur laquelle les étudiants travaillent pendant 3 fois 4h00 est celle représentée sur la figure 13.

HACHEUR PARALLELE

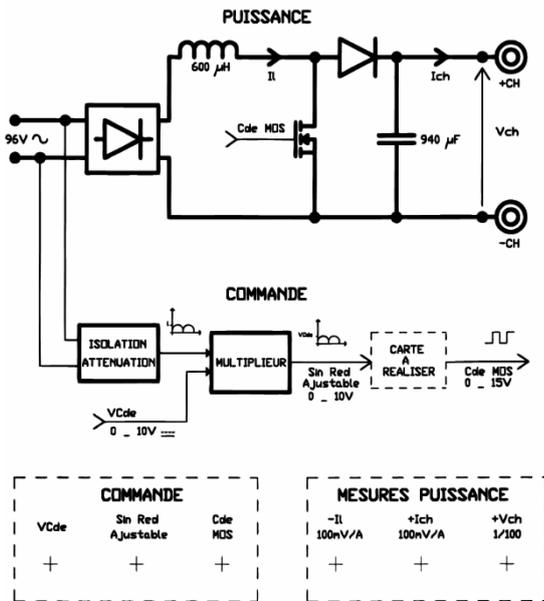


Figure 13 : Face avant de la maquette expérimentale

- Le réseau d'alimentation fournit une tension de 96 V efficace obtenue à partir du réseau 230V suivi d'un transformateur d'isolation abaisseur.
- L'inductance d'entrée vaut : $L = 600 \mu\text{H}$ et le condensateur de filtrage en sortie a une capacité de : $C = 940 \mu\text{F}$
- Les points de mesures disponibles sont les suivants :
 - La tension de sortie divisée par 100 : « $V_{ch}/100$ »
 - Le courant de charge via une tension avec la correspondance : « 100 mV/A »
 - Le courant de ligne (dans l'inductance) via une tension avec la correspondance: « 100 mV/A »
- Au niveau bloc intitulé « commande », on a :
 - Une entrée "Cde MOS" qui est la commande logique du MOS : soit un créneau d'amplitude 15V à rapport cyclique variable à élaborer (cf. ci-dessous).
 - La consigne de courant : "Sin Red Ajustable", c'est-à-dire un signal sinusoïdal redressé, en phase avec le réseau, servant de consigne pour régler le courant absorbé par le convertisseur ;

ce signal est élaboré en interne par la maquette. L'amplitude de celui-ci est réglable de 0 à 10V par le biais du signal "VCde" qui est donc une entrée et sera reliée à une alimentation de tension continue variable dans le cas où on ne règle que le courant, si on règle la tension ce sera l'entrée du correcteur de tension.

- Trois sécurités sont implantées sur la maquette relatives à la tension de sortie pour maintenir celle-ci en dessous de 380V, au courant qui traverse le MOS afin qu'il ne dépasse pas 10A et enfin à la fréquence de commande de l'interrupteur pour qu'elle n'excède pas 50 kHz. En cas de dépassement de l'un des seuils pré-réglés à l'intérieur du boîtier, le système de sécurité impose un signal nul pour la commande du MOS. La seule solution pour sortir de ce mode de protection est de couper l'alimentation générale de la maquette.

2.2 Mise en œuvre de l'absorption sinusoïdale du courant de ligne

En sortie du bloc « Isolation-Atténuation » de la figure 13, on obtient une sinusoïde redressée synchrone et en phase avec la tension du réseau ; son amplitude est réglable entre 0 et 10V grâce à « VCde ». On obtient donc en sortie du multiplieur la consigne de courant sinusoïdal redressé : « Sin Red Ajustable ».

Le bloc « Carte à réaliser » fait partie du travail des étudiants qui doivent donc élaborer sur une plaque à trous le signal de commande du MOS.

Comme en simulation, on opte pour une commande par hystérésis. La largeur de la fenêtre, qui règle directement l'ondulation du courant absorbé, est déterminée de telle manière que la fréquence de fonctionnement reste toujours inférieure à 40 kHz. Pour ce faire, il faut utiliser la relation (2) que l'on rappelle : $F_{\max} = \frac{V_S}{4.L.\Delta i_L}$.

En se fixant une tension maximale en sortie de 250V et une fréquence restant inférieure à 40kHz, on trouve $\Delta i_L = 2.6\text{A}$.

Le schéma de principe de la commande par hystérésis est donné en figure 14.

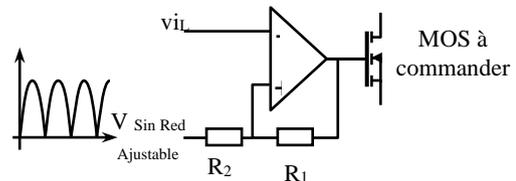


Figure 14 : principe de la commande par hystérésis.



V_{iL} est la tension image du courant mesuré dans l'inductance

V_{SinRed} ajustable notée par la suite V_{SinRed} est la tension image de la consigne de courant sinusoïdal redressé, issue de la maquette.

En appelant V_{out} la tension de sortie du comparateur, V_+ la tension sur l'entrée « + » du comparateur, on montre facilement que :

$$V^+ = \frac{V_{out} \cdot R_2}{R_1 + R_2} + \frac{V_{SinRed} \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

Pour $V_{iL} > V^+$, on a : $V_{out} = 0$, dit autrement :

$$V_{out} = 0 \text{ pour } V_{iL} > \frac{V_{SinRed} \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

De même, pour $V_{iL} < V^+$, on a $V_{out} = V_{sat}$, soit :

$$V_{out} = V_{sat} \text{ pour } V_{iL} < \frac{V_{sat} \cdot R_2}{R_1 + R_2} + \frac{V_{SinRed} \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

On peut représenter V_{out} en fonction de V_{iL} (cf. figure 15) :

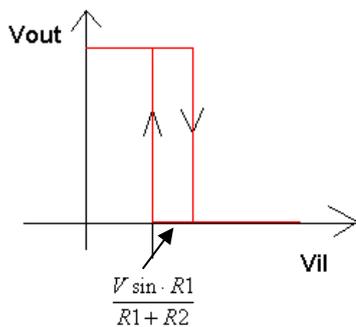


Figure 15 : Mise en évidence de l'hystérésis

En choisissant par exemple $R_1=10k\Omega$ et $R_2=47k\Omega$, on obtient $\Delta i_L = 2.6A$ ($V_{sat}=15V$).

Nous donnons en figure 16 le schéma du montage final intégrant les adaptations nécessaires à la fois en courant pour obtenir un rapport 1V/1A (amplificateur opérationnel muni de 2 résistances $R_3=10k\Omega$ et $R_4=100k\Omega$) et en tension (amplificateur opérationnel assorti de R_1 et R_2) ; il faut également prévoir un étage supplémentaire pour adapter le courant de sortie de notre montage à celui demandé par la grille du MOS (transistor 2N2222 et résistance $R_6=1,5k\Omega$).

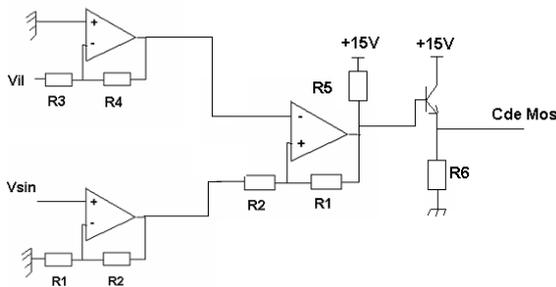


Figure 16 : Schéma électronique de la commande du MOS

• Résultats expérimentaux

Nous présentons sur la figure 17 l'exemple d'une courbe obtenue, celle du courant de ligne avec le zoom au passage par zéro mettant en évidence la distorsion évoquée dans la partie simulation. Bien sûr, les étudiants doivent interpréter les résultats obtenus, les valider et les comparer à ceux issus de la simulation ; on peut entre autres mesurer la fréquence maximale de commutation.

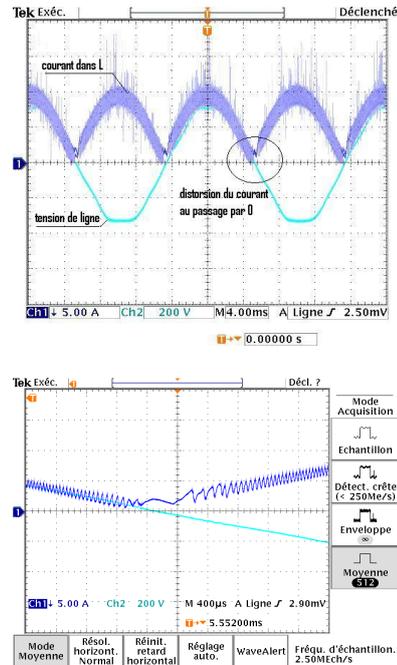


Figure 17 : Exemple de résultat expérimental

2.3 Mise en œuvre de l'asservissement de la tension de sortie

L'objectif est évidemment d'obtenir en sortie une tension constante quelle que soit la charge. Le schéma de principe est donné en figure 18 :

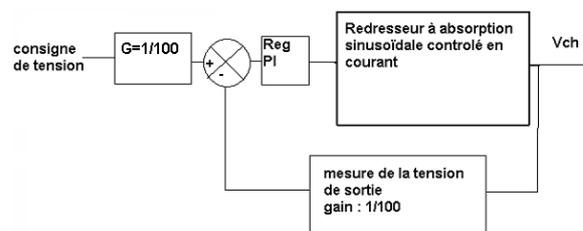


Figure 18 : Schéma de principe de la régulation de tension

Grâce à l'identification du système faite dans la partie simulation, on a déduit les paramètres du régulateur de type PI qui est mis en œuvre avec le montage de la figure 19.

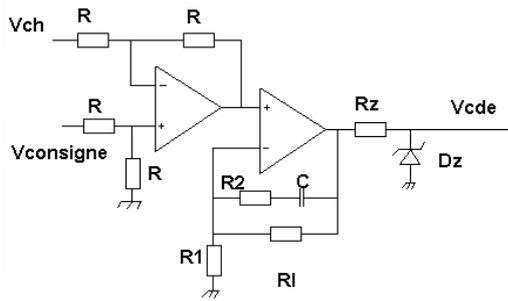


Figure 19 : Mise en œuvre de la régulation de tension

Le premier étage assure la comparaison de la tension de sortie à la consigne ($R=10k\Omega$), le deuxième étage correspond au correcteur PI avec $R1=10k\Omega$, $R2=39k\Omega$ et $RI=1M\Omega$ et $C=1\mu F$. Le circuit $Rz Dz$ limite simplement la valeur de $Vcde$ à 7V pour éviter de déclencher la sécurité de courant lors des transitoires. Nous présentons sur la figure 20 un résultat expérimental mettant en évidence l'efficacité de la régulation : un échelon de consigne est appliqué (passage de 1.5V soit 150V en sortie à 2.2V soit 220V). Le temps de réponse est estimé à 120 ms en accord avec la théorie aux erreurs de mesure près.

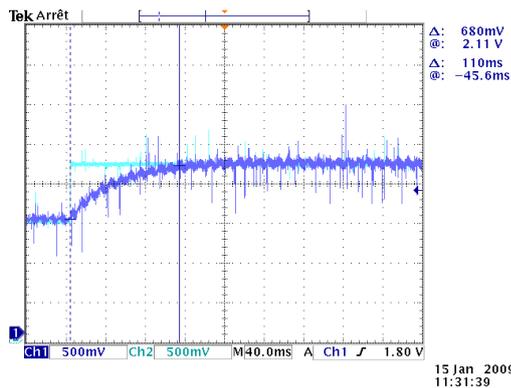


Figure 20 : Asservissement de la tension de sortie

Nous ne présentons pas dans cet article de résultat en régulation (variation de la résistance de charge), comme nous l'avons fait en simulation. Les étudiants, par contre, ont toute la liberté d'observer ce phénomène.

3. Conclusion

Nous partons d'un montage d'électronique de puissance très classique, à priori connu des étudiants -en l'occurrence un pont redresseur à diodes- nous mettons en évidence par le biais d'une simulation sous PSim la nécessité d'un élément supplémentaire pour que le courant d'alimentation du montage soit le plus sinusoïdal possible et en phase avec la tension réseau. Il faut ensuite dimensionner et mettre en œuvre le convertisseur qui réalise ce prélèvement sinusoïdal, en l'occurrence un hacheur survolteur lequel est aussi bien connu des étudiants qui l'abordent dès la première année. Cette étude est réalisée en simulation uniquement en 2^{ème} année et reprise en 3^{ème} année à l'aide d'une

maquette dont une partie doit être réalisée par les étudiants eux-mêmes.

Au travers du travail en simulation l'étudiant approfondit sa compréhension quant au rôle de chaque composant et de ses interactions avec les autres éléments du montage comme par exemple, l'inductance placée à l'entrée du hacheur. En mettant en œuvre une partie de la maquette sur une plaque à trous, ils perçoivent que celle-ci n'est pas forcément la « recopie » du montage simulé !

Enfin, notons que cette application est assez transversale dans le sens qu'elle concerne tout autant le réseau d'amenée de l'énergie (pollution harmonique), que la partie où est faite la conversion de l'énergie par le biais de dispositifs d'électronique de puissance (structure et commande) mais aussi la régulation de l'ensemble (courant et tension). Cette « transversalité » est l'un des objectifs qui nous tient à cœur !

Bien sûr, des prolongements pourraient être envisagés comme par exemple l'implantation d'une gestion du flux d'énergie réactive nécessitant toutefois l'utilisation d'une structure autre que l'association « Graetz-Boost ».

Références :

- [1] JP Ferrieux, F Forest, « Alimentation à découpage, convertisseurs à résonance », ed Masson, 1994.
- [2] J Fandino, R Perret, E Rullière, P Tixador, « Entraînements Electriques, tome 1 », Hermès Lavoisier, 2006
- [3] G Séguier, « les convertisseurs de l'électronique de puissance tome 1 : conversion alternatif-continu », Lavoisier, 1984.
- [4] R Ott, « Qualité de la tension – harmoniques », Techniques de l'ingénieur, Réf D4264, 10/12/2002
- [5] A Coullot, « Système d'alimentation pour équipement électriques », Techniques de l'ingénieur, Réf : E3620, 10/02/1998
- [6] Documentation en ligne/Tutorials du logiciel PSIM

Impact du Véhicule Electrique sur le Réseau de Distribution National - Compte-rendu de la soirée-débat organisée par la SEE

Résumé : Ce compte-rendu a été rédigé par JP. Ilary et F. Le Gall d'après les documents présentés par les trois intervenants, M Bernard d'ERDF, M Neau de RTE et M Ricaud de la société Schneider Electric.

1. Introduction

Quel sera l'impact de l'arrivée de flottes de véhicules « tout électrique » et de véhicules hybrides sur le réseau électrique national et local ? C'est cette question qui a fait l'objet d'une soirée-débat organisée par la SEE le 22 septembre 2011 à la Défense dans les locaux de RTE. Trois communications ont été prononcées par Gilles BERNARD d'ERDF, Emmanuel NEAU de RTE et Claude RICAUD de Schneider Electric.

2. Bilan des VE

Le contexte général présenté par Gilles Bernard est celui d'une politique de « décollage » du véhicule électrique avec déploiement a priori d'une infrastructure de recharge. D'après les projections, en 2020, le flux annuel des véhicules électriques (tout électrique ou véhicule hybride rechargeable) serait de 400 000 et le parc estimé à 2 millions. Les infrastructures de recharges associées devront alors être prévues la même année à hauteur de 4,4 millions dont 440 000 partagées sur la voirie et/ou les parkings (340 000 en charge lente et 60 000 à charge rapide).

Pour faire face à cette perspective, un plan d'actions gouvernemental est mis en place pour guider les collectivités dans l'aménagement de l'infrastructure publique (livre vert sur les infrastructures de recharges ouvertes au public pour les véhicules « décarbonés »).

3. Besoins de charge des VE

Les besoins de charge dépendent directement des besoins en déplacement de la population. Comme le montre la figure 1, 90% des déplacements journaliers sont inférieurs 25 km.

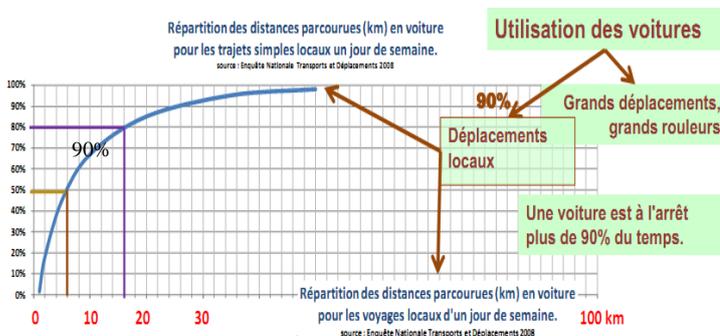


Figure 1 : Parcours journalier des véhicules en France

Si l'on ajoute à cela que les voitures sont à l'arrêt 90% du temps, cela nous donne quelques indications pour optimiser les moyens de charge à mettre à disposition des conducteurs.

Tout d'abord, il apparaît clairement qu'il faut privilégier des moyens de charges sur le lieu de stationnement de nuit. Les recharges seront principalement des compléments de charge pour récupérer, en moins de 2h la nuit, l'équivalent de la consommation journalière.

Parallèlement les conducteurs devront peu à peu modifier leurs habitudes en appliquant le principe suivant : « lorsque je m'arrête un temps suffisamment long, je me branche pour une recharge ».

Enfin, des solutions spécifiques sont à prévoir pour les grands rouleurs.

4. Stratégies de charge

Dans son intervention, Claude Ricaud insiste sur le fait que l'infrastructure de charge est essentielle à la création du marché et que son absence a été une des causes majeures des échecs passés. Il est donc primordial de prévoir une infrastructure globale permettant de répondre à tous les besoins des conducteurs.

En réponse à ce diagnostic, quatre types de charge sont envisagés en des lieux et pour des utilités différentes.

- La **charge normale** constitue la solution principale car elle se fait sur les lieux résidentiels, de stationnement ou professionnel. La charge est lente (8h pour une charge complète et 2 à 3 h pour une batterie déchargée au tiers) car limitée en puissance (3 kW).
- La **charge semi-rapide** sera utilisée comme solution d'appoint. Elle permettra de fournir une autonomie de 10 km pour 5 min de charge (puissance limitée à 22 kW).
- La **charge rapide** assurera grâce à ses 43 kW une solution pour les grands rouleurs (150km pour 30 min de charge).
- La solution d'**échange de batterie** réalisable en 5 min est elle aussi prévue pour les grands rouleurs

Dans les deux derniers cas, les applications nécessiteront l'utilisation de stations services ou de parking public. Lors de son intervention, Claude Ricaud présente les différents types de bornes EVlink développées par la société Schneider Electric pour chacune des applications précédentes.

La connexion au réseau de ces différents types de bornes répond au principe général suivant :

- Un ou plusieurs points de charge sont installés sur un réseau privé raccordé au réseau public au travers d'un « point de livraison » fourni par ERDF, intégrant le compteur.
- Le propriétaire ou l'opérateur des points de charge, choisit un fournisseur au point de livraison. Il fixe la puissance de son raccordement avec ERDF et souscrit une puissance maximale de ses consommations avec le fournisseur. S'il est opérateur de service de recharge, il inclut le prix de l'électricité qu'il achète dans le prix du service.

5. Impact sur le réseau

Lors de son intervention, Claude Ricaud fait le point sur les ordres de grandeurs qui caractérisent le réseau électrique français. La puissance totale installée est de 100 GW et la consommation annuelle française est de 500 TWh.

La consommation équivalente annuelle d'un habitant moyen étant de 2 MWh, si l'on reprend l'objectif de 2 millions de véhicules électriques (tout électrique et hybrides rechargeables) à l'horizon 2020, on obtient une puissance pic théorique de 8 GW (en charge normale) à 80 GW (charge rapide). Toutefois, on sait que statistiquement, les charges se feront à 90% selon le type « normal » et que seule un tiers du total des charges seront simultanées. La puissance de pointe se limitera donc à 5 GW et l'énergie consommée annuellement à 4 TWh soit une valeur inférieure à 1% du total disponible avec le réseau actuel.

Le réseau actuel est donc tout à fait capable de supporter l'impact du véhicule électrique en termes de demande d'énergie. En revanche, compte-tenu des spécificités des charges des batteries, il faut reporter autant que possible ces recharges dans les creux de charge des réseaux (figure 2) :

- En moyenne nationale, il faut donc privilégier la période nocturne (22h-8h).
- En moyenne régionale ou locale, il faudra s'adapter aux courbes de charge des maillons de réseaux qui ne sont en général pas synchrones avec la moyenne nationale.

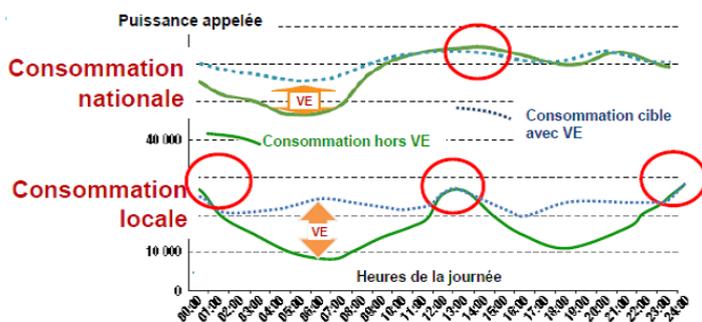


Figure 2 : Courbes de charge

De manière schématique, M Bernard décompose deux niveaux de régulation :

- Au stade de la conception et de l'installation, la régulation par le prix permettra de répercuter les coûts de raccordement et de renforcement.
- Au moment de la recharge, le pilotage temps réel permettra d'optimiser l'accord entre l'offre disponible sur le réseau et la demande de recharge.

La solution actuelle pour gérer la demande de charge consiste à asservir les recharges au signal d'heure creuse. Cette solution est déjà opérationnelle et adaptée aux courbes de charges locales.

A plus long terme, la gestion des recharges grâce aux solutions « smart-grid » permettront une adaptation plus fine au besoin. Dans sa présentation, Emmanuel Neau a exposé la démarche de modélisation et de simulation de la courbe de charge des véhicules électriques proposée par RTE. Selon les hypothèses faites a priori sur la nature de la taille du parc de VE, sur la proportion des véhicules tout électrique ou hybrides rechargeables, sur le comportement de charge et sur la répartition par usage (privé, commercial ..), les équipes de RTE ont simulé l'impact sur le réseau et proposé des mécanismes de limitation de celui-ci.

Ces solutions nécessitent des développements techniques, des évolutions dans la réglementation (la standardisation IEC est en cours d'élaboration) et une bonne concertation entre les différents acteurs.

Enfin, le point particulier de l'adéquation entre véhicules électriques et énergies renouvelables a été évoqué par M Ricaud. En effet, l'objectif 2020 pour les énergies renouvelables est le suivant :

- 5 400 MW, 6TWh pour le photovoltaïque,
- 25 000 MW, 59 TWh pour l'éolien.

Théoriquement, la demande de charge des véhicules électriques pourrait être complètement assurée par les sources d'énergies renouvelables. L'intervention des solutions « Smart-Grid » permettrait alors d'améliorer le « matching » entre l'offre d'énergie renouvelable et la demande de recharge. L'objectif d'une solution de transport « zéro émission » de CO2 serait en voie d'être atteint.

6. Conclusion

Ces trois interventions nous ont permis de bien poser le problème de l'impact du véhicule électrique sur le réseau de distribution.

Il s'agit d'une économie globale créatrice de valeur qui nécessite un effort financier de mise en œuvre mais aussi une réflexion sur les régulations appropriées. Il semble que, dans un premier temps, les signaux de type « heures creuses » seront l'arme principale de la régulation et que les solutions d'ajustement offre-demande plus fins de type « smart-grid » prendront le relais dans un avenir proche.

Et demain ... ?

Tour d'horizon des avancées technologiques

Dans cette nouvelle rubrique, nous proposons de faire le point sur les annonces faites dans la presse scientifique et qui pourraient déboucher sur des avancées dans un domaine particulier. Pour ce numéro, nous vous proposons quelques informations sur les batteries.

Capture de lithium à partir de centrales géothermiques (Technology Review, 16 nov 2011)

Sous l'effet de l'essor du véhicule électrique, la demande mondiale de Lithium, qui était approximativement de 102.000 tonnes en 2010, pourrait s'élever à 320.000 tonnes à l'horizon 2020. Alors que le procédé classique d'extraction du lithium consiste au pompage de la saumure en profondeur puis, après évaporation pendant 18 à 24 mois, en la production de carbonate de lithium, une nouvelle voie d'extraction basée sur l'exploitation de la saumure extraite dans les centrales géothermiques classiques pourrait voir le jour aux Etats-Unis. La société « Simbol » engagera la construction en 2012 d'une centrale de production d'une capacité de 16.000 tonnes de carbonate de lithium par an. En comparaison, le 3ème plus gros producteur produit 22000 tonnes par an. A l'horizon 2020, Simbol espère tripler sa production en utilisant d'autres centrales géothermiques. D'autres projets sont engagés dans le monde et pourraient dépasser la production de 426.000 tonnes/an en 2020, bien au-delà de la demande prévue.

A la recherche de la batterie idéale pour le réseau électrique (Technology Review, 28 sept et 22 nov 2011)

Actuellement, la technologie la plus courante pour le stockage de l'énergie électrique est le pompage-turbinage. Mais cette technique hydraulique est par nature limitée par la géographie et nécessite des investissements longs et coûteux. En comparaison, des batteries faibles coûts peuvent en principe être produites en grande quantité et placées où on le souhaite sur le réseau. L'utilisation des batteries connectées au réseau permettrait de stabiliser et donc d'intégrer un nombre encore plus important de sources d'énergies renouvelables comme les panneaux photovoltaïques et les éoliennes.

Malheureusement, les technologies actuelles de batteries sont soit trop chères (sodium-souffre : 1000 \$

le kW.h de capacité de stockage) soit trop limitées en nombre de cycles de charge (plomb-acide : 500 à 1000 cycles de charge) pour être utilisées massivement. Les autres technologies envisagées (lithium-ion, air comprimé, et batteries à flux continu *) restent trop chères et n'ont pas encore prouvé leur fiabilité.

En 2011, quelques annonces indiquent que de grands progrès sont envisageables dans un proche avenir :

- En juin, la société "Primus Power" annonce qu'elle optimise la production des batteries à flux redox. L'innovation consiste à permettre la production de masse de ces batteries dans des usines, grâce à la réduction en taille des cellules et à l'utilisation de matériaux de stockage à base de zinc. Le handicap principal de cette technologie, qui est de devoir être construite sur site, serait donc levé. Leurs cellules permettent de délivrer 20 kW chacune et leur coût serait proche de 500\$ par kW.h de capacité de stockage.

- En septembre, de nouvelles batteries développées à Pittsburgh et constituées d'éléments chimiques peu coûteux (un électrolyte aqueux et des éléments abondants comme le sodium et le manganèse) sont prévues pour un coût de 300\$ par kW.h. Elles peuvent durer au-delà de 5000 cycles de charge-décharge, affichent un rendement supérieur à 85 % et sont recyclables à 100%. Cette technologie proposée par la société Alquion aurait un coût comparable au stockage hydraulique. En revanche, ces batteries ont comme inconvénient d'être aussi lourdes et volumineuses que les batteries plomb-acide. En 2012, la société Alquion lancera son premier produit commercial et sa première usine de fabrication d'unités de 500 MW.h. Il restera à tester cette technologie à l'échelle du réseau pour valider les espérances.

- En novembre, des chercheurs de Stanford ont annoncé qu'ils réalisaient des électrodes en nanomatériaux pouvant se recharger 40.000 fois sans pertes notables de capacité. C'est le premier pas pour de nouvelles batteries « low-cost » utilisables pour cette application. Cette équipe de recherche travaille actuellement sur un prototype complet.

* Les batteries à flux continu (flow batteries) sont constituées d'électrolytes liquides qui peuvent être stockés dans des conteneurs extérieurs à la batterie elle-même. Ces batteries peuvent être rapidement rechargées par simple renouvellement de l'électrolyte.

Projet de batteries à flux continu (www.bulletins-electroniques.com, 4 fév 2011)

Le Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) a répondu à l'appel à projets lancé par l'Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E) (Agence gouvernementale américaine pour la promotion et le financement de la recherche dans le domaine de l'énergie) en proposant une solution de batteries à flux continu hydrogène - brome (H₂-Br₂).

Le cahier des charges de l'appel à projets est le suivant :

Objectifs principaux :

- Une cellule prototype de 50 cm² et de 20 W doit être réalisée dans les deux ans ;
- coût du stockage : inférieur à 100\$/kWh ;
- durée de stockage : supérieure à 60 minutes ;
- temps de réponse : inférieur à 3 minutes ;
- puissance ajustable de 50 W à 20 kW.

Objectifs secondaires :

- 20% de pertes d'énergie/puissance maximum après 5.000 cycles ;
- rendement : supérieur à 80% ;
- auto-décharge en 24h : inférieure à 5% ;
- durée de vie : 10 ans.

Les projets dans ce domaine sont donc fortement incités par la puissance publique américaine.

Augmentation de la capacité des batteries Lithium-Ion (Technology Review, 30 sept 2011)

Les électrodes des batteries lithium-ion reliées ensemble par un nouveau matériau hautement conducteur atteignent des capacités de stockage beaucoup plus grandes sans augmentation de coût. Le point clé est l'utilisation d'un polymère élastique et hautement conducteur permettant d'exploiter les propriétés de stockage d'énergie du silicium, de l'étain et d'autres matériaux qui sont ordinairement instables. Les chercheurs du LBNL ont fabriqué des polymères pour produire une anode en silicium avec une capacité de stockage 30% supérieure à celles disponibles sur le marché actuel.

Rappelons que lorsqu'une batterie au lithium-ion est chargée, les ions de lithium sont attirés par l'anode et que, plus l'anode retient de lithium, plus la capacité de stockage de la batterie augmente. Le silicium

est un des matériaux les plus prometteurs pour les anodes car il peut stocker 10 fois plus de lithium que le graphite qui est utilisé classiquement dans les batteries lithium-ion. Cependant le silicium change de volume d'un facteur 3 à 4 entre les phases de charge et décharge, la capacité de la batterie baisse alors au bout de quelques cycles. Pour pallier cet inconvénient, des technologies de croissance de nano-fils de silicium ont été mises en œuvre. Ces techniques ne sont pas encore classiquement utilisées dans les usines de fabrication de batteries mais l'équipe du LBNL travaille sur son implantation dans les process industriels.

Les anodes fabriquées par le groupe de recherche de Berkeley ont été testées pour plus de 650 cycles de charge. Elles tiennent une capacité de 1400 mA.h/g soit beaucoup plus que les 300 mA.h/g des anodes conventionnelles. Les batteries complètes stockent environ 30% de plus que les batteries lithium-ion commerciales.

L'énergie des métros pour alimenter le réseau électrique (Technology Review, 10 sept 2011)

L'autorité des transports de Pennsylvanie du Sud (SEPTA) pilote une technologie "smart grid", qui pourrait économiser 40% de la consommation annuelle d'électricité en installant des batteries dans une des sous-stations d'alimentation du train afin de récupérer l'énergie correspondant aux phases de freinage.

On rappelle que dans les systèmes de récupération classique sans utilisation de batteries, la récupération de l'énergie de freinage d'un train pour aider un autre train à accélérer ne peut se faire que si les phases d'accélération et de décélération sont concomitantes. Sinon, cette énergie est perdue.

Dans ce projet pilote qui sera opérationnel l'été 2012, la gestion de la batterie est assurée par un logiciel qui décide de l'allocation de la puissance accumulée dans la batterie en l'utilisant soit pour la traction d'un train, soit pour alimenter le réseau électrique.

Cette batterie pourra ainsi aider le train pendant les phases d'accélération, limiter la consommation électrique ou fournir une énergie disponible pour être réinjectée sur le réseau électrique. Ce projet implique une sous-station sur les 38 sous-stations du réseau et permettrait d'économiser 500.000\$ par an. Cet effet serait accru en augmentant le nombre de sous-stations équipées de batteries.

