



*Applications
pédagogiques
Académies
d'Aix, Marseille,
Nice et Corse*

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE



*Société de l'Électricité, de l'Électronique
et des Technologies de l'Information
et de la Communication*



SOCIÉTÉ de l'ELECTRICITE, de l'ELECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.

17, rue Hamelin, PARIS 75 783 CEDEX 16
Tel : 01 56 90 37 00 Fax : 01 56 90 37 19
site web : www.see.asso.fr

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

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

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

<p>La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue Hamelin 75 783 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 F. Boucher : revue3ei.art@voila.fr</p> <p>Communication Micheline BERTAUX communication@see.asso.fr 01 56 90 37 17 publicité au rapport</p> <p>Abonnement (4 numéros par an) déc. 2008, mars, juin, sept. 2009. tarifs TTC : <u>Individuel</u> : France et CEE36 € Pays hors CEE46 € <u>Collectivités</u> France et CEE52 € Pays hors CEE65 €</p> <p>Réalisation et impression Repro-Systèmes 23, rue de Verdun 77 181 Le Pin</p> <p>Routage et Expédition Départ Presse ZI les Richardets 93 966 Noisy le Grand</p> <p>Dépôt Légal : Septembre 2009</p> <p>Commission Paritaire 1212 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n°58</p> <p style="text-align: center;">Applications pédagogiques académies d'Aix Marseille Nice et Corse</p> <p>p. 2 <i>Éditorial,</i></p> <p>p. 3 <i>Publications, Informations,</i></p> <p>p. 4 <i>La filière génie électrique dans l'académie d'Aix-Marseille</i> P. Lefort IA IPR STI Rectorat de l'Académie d'AIX-MARSEILLE</p> <p>p. 8 <i>Les formations Technologiques du domaine du génie électrique sur les académies de Nice et de Corse</i> A. MARCANT IA-IPR STI Rectorat de l'académie de NICE</p> <p>p. 11 <i>Quelle physique appliquée pour une nouvelle STI ?</i> P. LOOS IA-IPR sciences physiques Rectorat de l'académie d'AIX-MARSEILLE</p> <p>p. 15 <i>Installation photovoltaïque académique</i> P. Lefort IA IPR STI Rectorat de l'Académie d'AIX-MARSEILLE</p> <p>p. 20 <i>Réseau électrique haute qualité</i> J. SERRES, P. DUBOIS, C. JAUNAY S. ESCOLANO Lycée Marie Madeleine Fourcade GARDANNE</p> <p>p. 27 <i>Contraintes engendrées sur les conducteurs par la pollution harmonique</i> C.GREZE, L.BOURGOIS Lycée Jules Ferry CANNES</p> <p>p. 32 <i>Éclairage et économie d'énergie : Étude de deux gradateurs</i> J. AGNEL, C. CARRERE, F. SARNETTE Lycée de Lorgues LORGUES</p> <p>p. 42 <i>Rénovation d'une station de pompage</i> P. LEFORT IA IPR STI J.M. TRUC, J.L. RODRIGUEZ Lycée Philippe de Girard AVIGNON</p> <p>p. 48 <i>Chauffe Eau Solaire Individuel (CESI) Bilan de fonctionnement sur une année</i> P. DEREUMAUX G. DORIGNAC S. SUDNIKOWICZ-CAREL Lycée Pierre Gilles de Gennes DIGNE LES BAINS</p> <p>p. 56 <i>Étude d'un groupe froid positif</i> B. STRAUDE T. TOURTCHOUNIAN Lycée Don Bosco MARSEILLE</p> <p>p. 62 <i>Système de radiographie de pièces composites pour l'aéronautique</i> S. BASQUIN V. FERRERI R. AMORETTI P. TREHIN Lycée Paul VINCENSINI BASTIA</p> <p>p. 67 <i>Exploitation pédagogique d'un banc didactique de chauffage</i> K. BEJAOUI J-D. HARQUET J-Y. MURGUE Lycée DON BOSCO NICE</p> <p>p. 73 <i>DOSSIER RESSOURCES : Production d'énergie électrique en Corse :</i> <i>Les micro centrales</i> R. AMORETTI Lycée Paul VINCENSINI BASTIA</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).

Voici déjà le quatrième numéro académique, qui cette année, est pris en charge par les académies d'**Aix Marseille** et de **Nice-Corse**. Un grand merci à **Mr Pascal Loos** IA-IPR de Sciences Physiques (Académie d'Aix-Marseille) qui en a dirigé la composition, ainsi qu'à ses collègues **Mr Patrick Lefort** IA-IPR de STI (Académie d'Aix-Marseille) et **Mr André Marquant** IA-IPR de STI (Académie de Nice).

Après une présentation des différentes académies participantes, vous trouverez des articles décrivant des projets réalisés par les élèves et les équipes enseignantes, certains en collaboration avec des sociétés industrielles, mais vous trouverez également des documents pédagogiques directement exploitables en séances de TP et un «dossier ressource» sur une micro centrale en Corse.

En raison de la production abondante d'articles et de la limitation du nombre de pages par numéro, nous publierons l'article sur « Les énergies renouvelables et l'habitat » du Lycée du Rempart à Marseille associé à l'université de Marseille ainsi que l'article « Décharger des batteries, quelle drôle d'idée ! » du Lycée Rouvière à Toulon dans le numéro de Décembre 2009.

Pour l'année à venir, Décembre 2009 à Septembre 2010, la prévision des thèmes abordés est la suivante :

- **L'énergie des mers** en Décembre
- **Les Standards des bus de communication** en Mars
- **Les aspects thermiques dans les convertisseurs** en Juin

Nous recherchons de nouvelles candidatures d'académies qui puissent prendre en charge la confection du numéro académique de Septembre assurant ainsi la poursuite de notre tour de France.

Si vous avez des idées ou des souhaits à ce sujet ou plus généralement, vous pouvez nous faire parvenir vos idées, vos réactions, vos suggestions à l'adresse e-mail revue3ei.cour@voila.fr

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.

Pour que cette revue qui contribue à la transmission des connaissances puisse continuer de paraître, nous avons toujours besoin de votre aide. Nous comptons sur vous pour saisir toutes les occasions pour faire connaître et faire vivre notre revue. Une attention particulière doit être portée à l'information en direction des jeunes collègues que nous souhaiterions voir abonnés en plus grand nombre.

Bonne lecture.

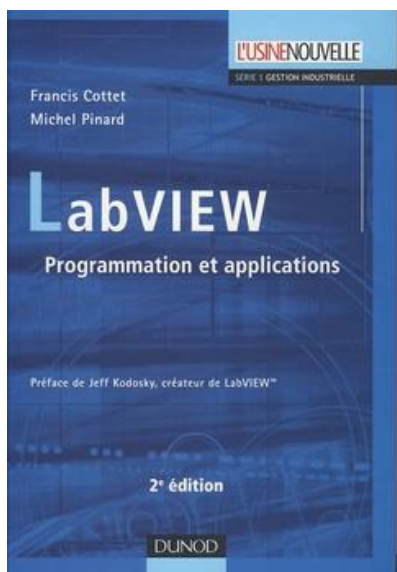
Le Comité de Publication de la Revue3EI

La Revue 3EI

Comité de publication

Hamid BEN AHMED
Jean BONAL
François BOUCHER
Jean FAUCHER
Gilles FELD
Jean-Philippe ILARY
Chérif LAROUCI
Marie Michèle LE BIHAN
Franck LE GALL
Pascal LOOS
Claude OBERLIN
Oviglio SALA
Jean-François SERGENT
Jean-Claude VANNIER
Pierre VIDAL

***Lire la revue 3EI c'est bien et même très bien,
Lire la revue 3EI en étant abonné c'est encore mieux !!!!***



LabVIEW Programmation et applications

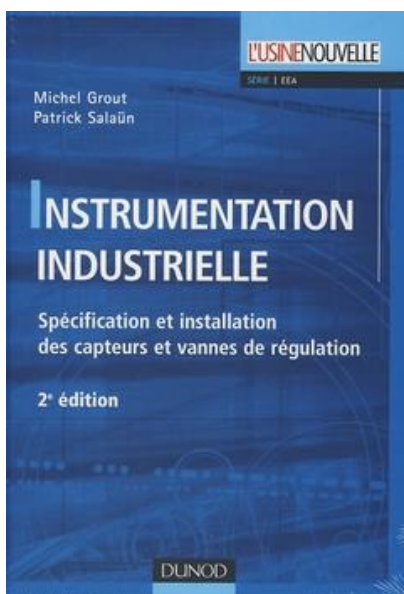
Francis Cottet Michel Pinard

Collection Technique et Ingénierie Editions DUNOD

LabVIEW™ est un logiciel industriel de simulation qui s'adresse à tous les techniciens et ingénieurs chargés de développer une application de mesures, de tests ou de contrôle/commande avec une interface utilisateur de très grande interactivité. Cette application peut aller de la simple analyse de données provenant d'un appareil de mesure connecté par sa liaison série, au contrôle d'un procédé physique complexe (avec des contraintes temporelles) relié au micro-ordinateur par des interfaces de type acquisition et restitution de données. Cet ouvrage permet au lecteur de s'initier au logiciel, d'en tirer le meilleur profit ou d'en approfondir sa connaissance, via théorie et exemples d'applications détaillés. Cette seconde édition présente les spécificités de la version 8.5 du logiciel (nouvelle interface, nouvelles fonctionnalités), commercialisée en octobre 2008.

Sommaire :

Les concepts et l'environnement de programmation LabVIEW. Les bases de la programmation LabVIEW. Applications : traitement de données. Applications : acquisition de données et automatisation. Applications : échange de données et communication. Programmation avancée en LabVIEW. Annexes.



Instrumentation industrielle

Spécification & installation des capteurs & des vannes de régulation

Grout Michel, Salaun Patrick

Collection Technique et Ingénierie Editions DUNOD

En instrumentation industrielle, certains matériels subissent plus d'agressions que d'autres et méritent une attention particulière : c'est le cas des indicateurs, des transmetteurs de mesure et des vannes de régulation. Cet ouvrage propose une approche pratique et concrète pour choisir, commander, installer et entretenir les matériels d'instrumentation en les adaptant au processus et aux environnements climatique et industriel : fiches de calcul et feuilles de spécification des vannes de régulation, schémas types d'installation des matériels, règles à suivre pour le raccordement au procédé, aux sources d'énergie et aux autres éléments du système de contrôle. Cette 2e édition tient compte des nouvelles normes et réglementations en vigueur et apporte des compléments, notamment sur les réseaux de terrain. Cet ouvrage est l'outil de travail indispensable des techniciens et ingénieurs de bureaux d'études, des services travaux neufs et maintenance des usines, des installateurs et des régleurs. Il sera également utile aux étudiants en instrumentation et en régulation.

La filière génie électrique dans l'académie d'Aix-Marseille

Patrick LEFORT IA IPR STI

Rectorat de l'Académie d'Aix-Marseille

Résumé : accueillie dans de nombreux lycées technologiques, l'ensemble de la filière génie électrique se développe par l'ouverture de nouveaux établissements. Les partenariats noués avec les entreprises industrielles permettent en STS une pédagogie de projet qui tend à s'accroître.

1. Géographie

L'Académie d'Aix-Marseille s'étend sur 4 départements : les Bouches du Rhône, le Vaucluse, les Alpes de Haute Provence et les Hautes Alpes, découpés en 16 bassins de formation. La surface cumulée est de 21 394 km² (3,9 % du territoire métropolitain).

Entre Arles et Briançon nous avons une distance de 303 km parcourus en 4 heures de route.



Les vallées de la Durance et du Rhône structurent le paysage.

Trois des quatre plus grandes surfaces communales françaises se trouvent dans cette académie :

- Arles (Bouches-du-Rhône) 758,93 km²
- Saint-Paul (La Réunion) 241,28 km²
- Marseille (Bouches-du-Rhône) 240,62 km²
- Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône) 186,08 km²

2. Démographie

Les quatre départements composant l'académie d'Aix-Marseille totalisent 2 801 176 habitants (4,46 % de la population de France métropolitaine).

70,11 % de la population de l'académie vit dans les Bouches-du-Rhône et la seule ville de Marseille avec 847 084 habitants est plus peuplée que la somme des départements des Alpes de haute Provence, des Hautes-Alpes et du Vaucluse.

Pour la région PACA, on constate une forte croissance de la population régionale entre 1999 et 2008 : au 1^{er} janvier 2008, la population se chiffre à 4 891 000 personnes.

Depuis 1999, la région a ainsi gagné près de 45 000 habitants par an. Cela correspond à un rythme annuel de croissance de 0,92 %, qui situe Provence-Alpes-Côte d'Azur nettement au-dessus de la tendance nationale (0,67 % par an en France métropolitaine).

Sur la période du 1^{er} janvier 1999 au 1^{er} janvier 2008, la croissance de la population régionale a été alimentée en grande partie par les migrations. Mais l'excédent des naissances sur les décès a contribué pour environ un quart à la croissance démographique, soit 95 000 personnes. L'année 2008 annonce un excédent naturel très élevé. Ce mouvement s'expliquerait par un nombre de naissances exceptionnel.

À la rentrée scolaire 2008, la baisse des effectifs d'élèves scolarisés se poursuit dans les deux académies de la région. Ce recul touche presque tous les niveaux d'enseignement.

3. Industrialisation

Le panorama des entreprises régionales permet de recenser dans le domaine des industries des biens d'équipement : industrie des équipements électriques et électroniques 1732 établissements (soit 11,1% du national) et dans le domaine des industries des biens intermédiaires : industrie des composants électriques et électroniques 376 établissements (soit 7,9% du national)ⁱ.

Besoins en emplois : on peut reprendre les conclusions d'une étude menée en 2007ⁱⁱ et qui pronostiquait à l'horizon 2009 : « Plus de 60% des entreprises procéderont à au moins un recrutement dans les 4 années à venir. Pour les 188 entreprises retenues, les besoins de recrutement sont au total de plus de 600 salariés. 47% d'entre eux permettront de « pourvoir de nouveaux postes » ou de « faire face à des innovations technologiques ou de produits ».

Chaudronnier (14,33 %), Ingénieur (12,37 %) et Électrotechnicien (12,32 %, dont 45 % de débutants) sont les emplois sur lesquels vont porter près de 40 % des recrutements à venir ».

La filière du génie électrique est ainsi bien représentée avec un dynamisme certain. Les deux cartes ci-contre permettent de situer les zones d'activité industrielles.

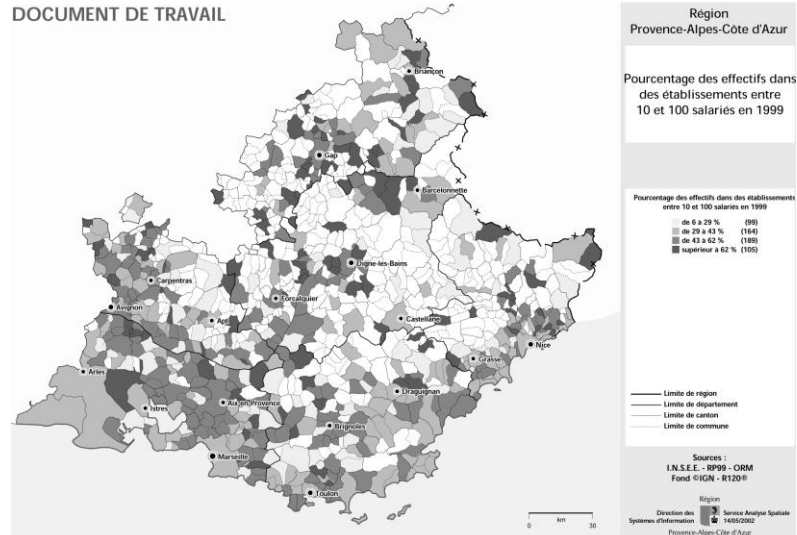
Ce tissu industriel favorise au sein des sections de STS une pédagogie de projet très dynamique. Ainsi, depuis de nombreuses années, les sections de BTS électrotechnique présentent 70 à 78% de thèmes industriels. Il en est du même ordre pour les autres sections de STS de la filière du génie électrique. Le BTS rénové « systèmes électroniques » s'est lui aussi engagé dans la pratique des thèmes industriels et les entreprises locales reconnaissent et valorisent les compétences des équipes en place.

Des développements de produits pédagogiques sont aussi courants, en partenariat avec les sociétés régionales SET, ERM, Astriane, Ledent, Didastel, etc.

Toute cette production pédagogique (plus de 2500 documents) se trouve sur le site rectoral à l'adresse suivante :

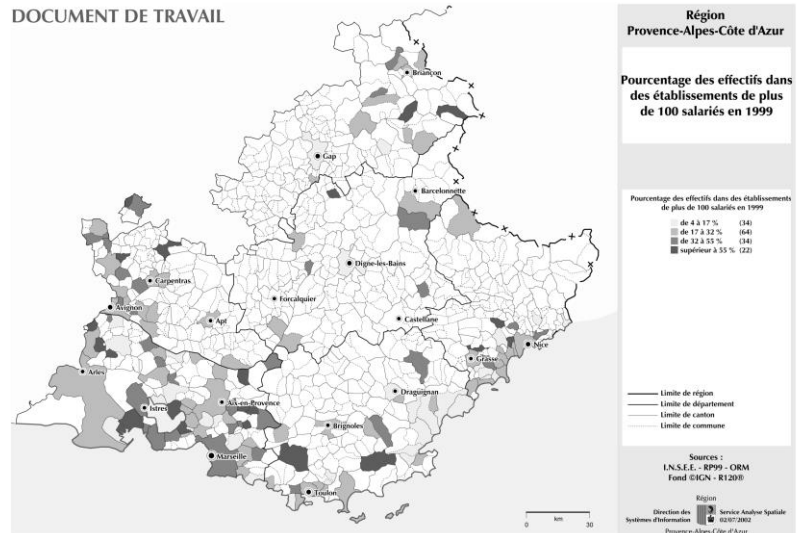
<http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/index.htm>

DOCUMENT DE TRAVAIL



Implantation régionales des établissements industriels de 10 à 100 salariés

DOCUMENT DE TRAVAIL



Implantation régionales des établissements industriels > 100 salariés



Balise développée avec la société SET



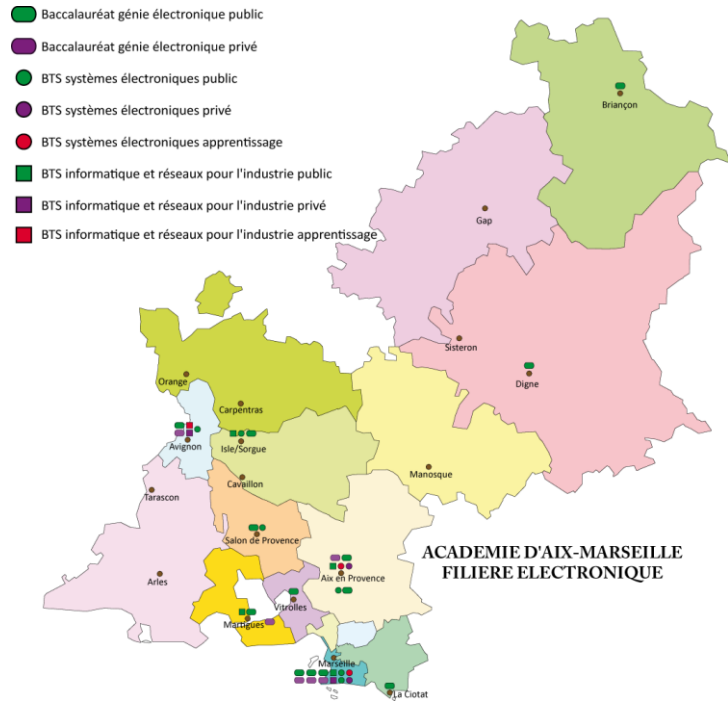
CESI développé avec la société ERM

4. Cartes des formations

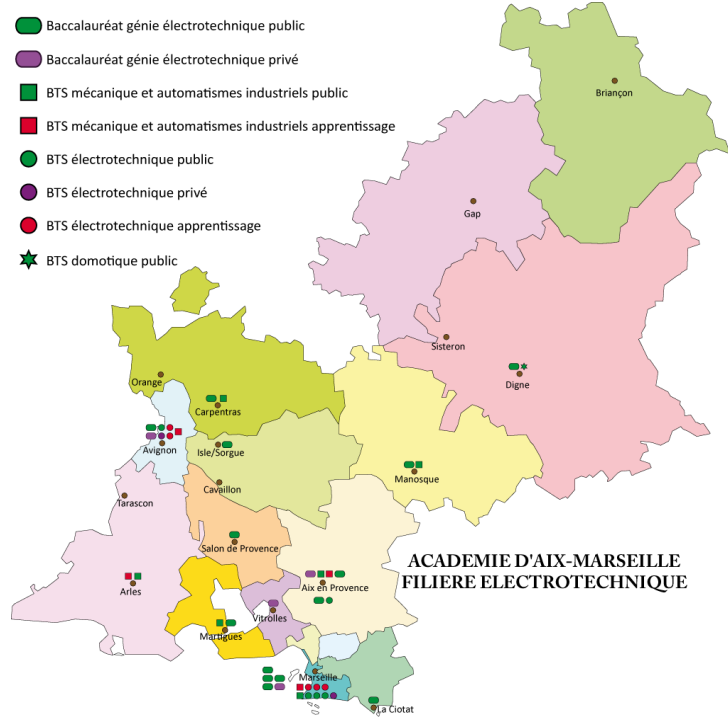
Historiquement, la part du génie électrique dans l'académie d'Aix-Marseille, et plus particulièrement du génie électronique est importante au sein des enseignements technologiques (en pourcentage, plus important que dans toute autre académie).

La part des établissements privés sous contrat est elle aussi significative (9 établissements avec 625 élèves et étudiants relevant du génie électrique).

La carte suivante montre les implantations des sections relevant du génie électronique.

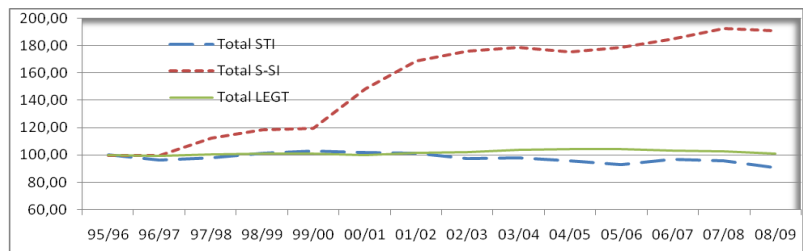


Tandis que les sections relevant de la filière génie électrotechnique sont réparties suivant la carte académique ci-contre :



4.1 Effectifs et évolutions

En portant sur un même graphique les effectifs de première et terminale des LEGT (public & privé sous contrat) en regard avec les effectifs de première et terminale STI et S-SI, on constate sur 14 ans une bonne tenue des effectifs de STI et une croissance très importante des effectifs de S-SI (passage de 920 à 1760 élèves sur 14 ans en effectifs cumulés).



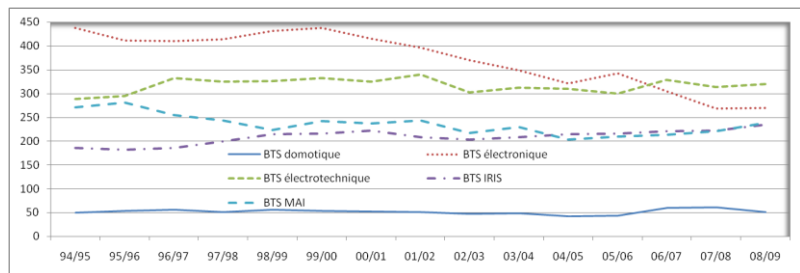
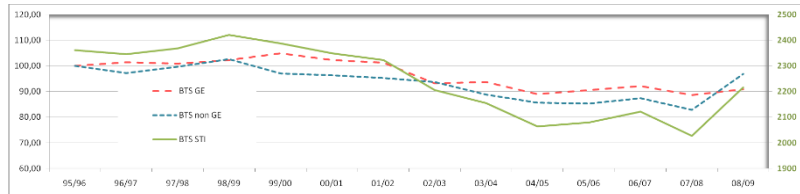
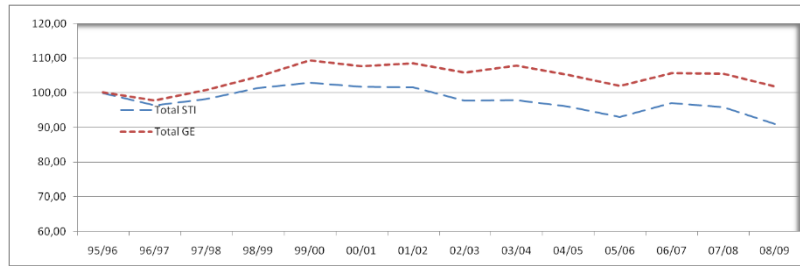
La part du génie électrique dans l'ensemble des effectifs de premières et terminales STI est loin d'être négligeable (68% en 2008-2009) et l'évolution de ses effectifs de première et terminale cumulés montre, malgré des aléas, une bonne résistance.

En ce qui concerne les BTS, là aussi les effectifs des BTS du domaine du génie électrique se maintiennent alors que les autres BTS, grâce notamment aux BTS du domaine du génie civil, évoluent très favorablement cette année. Après avoir dépassé les effectifs de 2400 étudiants en BTS STI dans l'académie en 98/99 et être descendu à 2000 étudiants en 07/08, nous remontons à 2200 étudiants cette année soit une perte de 10% en 14 ans.

Notons la création à la rentrée 2008 d'un BTS MAI au nouveau lycée des Iscles de Manosque.

Pour ce qui concerne plus précisément les BTS du domaine du génie électrique, les évolutions ne sont pas identiques pour tous les BTS comme le montre le graphique ci-contre :

Tous les BTS du domaine se maintiennent dans une fourchette de $\pm 7\%$ à l'exception du BTS *systèmes électroniques* qui passe de 440 à 270 étudiants soit une baisse de 38% en 14 ans.



4.2 Résultats aux examens

Globalement sur l'académie à la session 2008 les résultats régionaux du baccalauréat professionnel subissent une forte baisse tandis qu'ils augmentent pour les séries générales et surtout technologique. Les résultats académiques correspondent aux résultats nationaux.

Pour les BTS, si l'on excepte le BTS systèmes électroniques qui a toujours présenté un résultat académique supérieur aux résultats nationaux (sauf en 2008), sur les quatre dernières sessions on constatait un très léger écart négatif des résultats académiques sur les résultats nationaux, écart qui s'est inversé sur la session 2008 pour les BTS MAI, électrotechnique et IRIS.

	2005			2006			2007			2008		
	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.
Génie Electronique												
Académie	609	476	78,2%	552	416	75,4%	541	414	76,5%	561	440	78,4%
National	9702	7602	78,4%	9373	7317	78,1%	8791	7198	81,9%	8095	6199	76,6%

	2005			2006			2007			2008		
	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.
Génie Electrotechnique												
Académie	592	449	75,8%	555	422	76,0%	564	459	81,4%	633	508	80,3%
National	14595	10812	74,1%	14401	10811	75,1%	13544	10887	80,4%	12433	9871	79,4%

	2005			2006			2007			2008		
	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.
BTS Systèmes électroniques												
Académie	171	119	69,6%	173	138	79,8%	157	123	78,3%	137	109	79,6%
National	2424	1661	68,5%	2439	1874	76,8%	2142	1624	75,8%	1996	1650	82,7%

	2005			2006			2007			2008		
	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.
BTS Electrotechnique												
Académie	219	151	68,9%	199	130	65,3%	194	139	71,6%	204	182	89,2%
National	4103	2831	69,0%	4275	3263	76,3%	3985	2977	74,7%	4163	3526	84,7%

	2005			2006			2007			2008		
	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.
BTS IRIS												
Académie	103	74	71,8%	101	73	72,3%	116	85	73,3%	89	74	83,1%
National	2133	1510	70,8%	2088	1553	74,4%	2033	1520	74,8%	2008	1595	79,4%

	2005			2006			2007			2008		
	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.
BTS Domotique												
Académie	21	18	85,7%	17	13	76,5%	27	15	55,6%	37	23	62,2%
National	351	289	82,3%	351	246	70,1%	374	272	72,7%	390	304	77,9%

	2005			2006			2007			2008		
	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.	Pr.	Ad.	Ad./Pr.
BTS MAI												
Académie	139	89	64,0%	133	85	63,9%	119	94	79,0%	125	102	81,6%
National	2521	1874	74,3%	2581	1766	68,4%	2444	1921	78,6%	2303	1820	79,0%

i Chiffre INSEE 2009

ii Etude sur les besoins en recrutement dans la métallurgie en PACA OREF 28 février 2007

Les formations technologiques du domaine du génie électrique sur les académies de Nice et de Corse

André MARCANT

IA-IPR de sciences et techniques industrielles
Rectorat de l'académie de Nice

Résumé : présentation du contexte économique, énergétique et des formations STI « Génie électrique » sur les académies de Nice et de Corse.

I. GÉOGRAPHIE ET DÉMOGRAPHIE

La région PACA rassemble deux académies : Aix-Marseille et Nice. L'académie de Nice regroupe les départements des Alpes Maritimes et du Var. Ces deux départements comptent chacun une population sensiblement identique d'un million d'habitants. Dans ces départements, les élèves du premier et du second degré constituent 18 % de la population. L'étude des effectifs montre une très légère diminution de la population (0,1 % / an depuis cinq ans), due uniquement à l'affaiblissement du nombre d'élèves scolarisés sur le département des Alpes Maritimes. Enfin sur cette académie, les effectifs des établissements privés représentent un élève sur dix.

Quant à la Corse, elle abrite 260 000 habitants, constitués par 17,8 % d'élèves du premier et du second degré. Les effectifs sont stables dans le premier degré, ils diminuent dans le second degré.

II. L'ACTIVITÉ ÉCONOMIQUE SUR LES ACADEMIES DE NICE ET DE CORSE

Dans le Var, l'activité dépend principalement du secteur touristique, ce qui génère une part importante d'emplois dans le secteur tertiaire (+ de 80 %). L'agriculture est encouragée et le secteur industriel emploie simplement 7,5 % de la population active.

Dans les Alpes Maritimes, l'activité économique est un peu plus diversifiée. Le secteur tertiaire emploie 76 % des personnes actives salariées, 12,5 % dans l'industrie et 9,2 % dans le BTP. Le secteur des technologies de l'information et de la communication Internet, conception de logiciels, Télécommunications, Composants et systèmes électroniques, Réseaux hardware ou software, Services associés est très présent. Il concerne plus de 1100 entreprises et 20 000 emplois.

En Corse, l'économie repose essentiellement sur le secteur tertiaire. La Corse est dépourvue de tradition industrielle pour de multiples raisons, notamment la pauvreté de ressources naturelles et un développement économique largement endogène. On dénombre en Corse simplement une quarantaine d'entreprises industrielles dont moins de la moitié emploient plus de vingt personnes, pour un effectif industriel total de 900

personnes (hors entreprises unipersonnelles). Toutefois des entreprises innovantes se sont implantées, notamment dans le secteur aéronautique ou des nouvelles technologies de transmission et de communication.

Les lycées technologiques industriels de l'académie conduisent avec ces entreprises des relations remarquables. Les premiers liens ont été établis avec le lycée Laetitia Bonaparte à Ajaccio, pour s'étendre aujourd'hui au lycée Vincensini. Les étudiants des classes préparatoires et des sections de BTS participent à l'innovation dans ces entreprises, au travers de projets. Un exemple est présenté ci-après avec la société « Corse composite » et le lycée Vincensini.

III. LA DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LE SUD-EST

Les départements du Var et des Alpes Maritimes sont dans une situation énergétique particulière, vis-à-vis de la distribution de l'énergie électrique. Il n'y a pas sur ces départements d'usine importante de production d'énergie électrique, en dehors de quelques sites hydro-électriques de petite puissance et l'alimentation de l'extrême Sud-Est est assurée par une seule ligne T.H.T. Cette situation de dépendance énergétique particulièrement fragile a conduit à une coupure d'électricité de plusieurs heures pour plus d'1,5 millions de foyers le 3 novembre 2008.

Cet incident a démontré la nécessité de compléter le réseau de distribution avec une ligne supplémentaire de 225 000 volts qui sera partiellement enfouie pour préserver l'environnement. Il a conforté les responsables des Alpes Maritimes dans la politique de développement des énergies renouvelables, par des opérations concrètes et dans des délais proches : fermes photovoltaïques, géothermie marine et terrestre, une approche innovante des pompes à chaleur sur eau de mer, avec la référence voisine du Grimaldi Forum de Monaco. Dans ce cadre, le solaire électrique est vivement encouragé au niveau des particuliers par des aides du conseil général des Alpes Maritimes. C'est aussi l'objectif de mettre en application, à grande échelle, les principes de l'aménagement durable sur un territoire vaste et sensible, situé de part et d'autre du fleuve du Var sur la

zone d'influence immédiate de la ville de Nice, avec notamment l'équipement en panneaux solaires sur les toitures des bâtiments de la zone industrielle du Var, ou encore la construction de « champs » de panneaux solaires. Dans ce cadre la dotation, par le conseil régional d'un système solaire électrique pour tous les lycées, qui offrent une formation dans le domaine du génie électrique est particulièrement pertinente.

Un autre axe concerne l'accroissement de l'efficacité énergétique afin d'économiser 20 % de la consommation énergétique. Ainsi, les bâtiments tertiaires à construire par le Conseil général des Alpes-Maritimes, la Communauté urbaine Nice-Côte d'Azur et la Ville de Nice, à compter du 31 décembre 2009, devront être à énergie positive. Quant aux logements publics et sociaux, ils devront à la même date respecter la norme de consommation de 50 kWh/m²/an avec la labellisation possible Effinergie. Dans le secteur privé, la norme minimale à appliquer sera, à la même date de 50 kWh/m²/an.

Les bâtiments existants devront eux, à terme, réduire leur consommation à 80 kWh/m²/an. Tous les résidents de l'agglomération niçoise peuvent d'ores et déjà, grâce à l'étude thermographique réalisée par la communauté urbaine, connaître le niveau de déperdition de l'énergie de leur logement. <http://www.agglo-nice.fr/thermo-carte.htm>

IV. PRODUCTION ET DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE EN CORSE

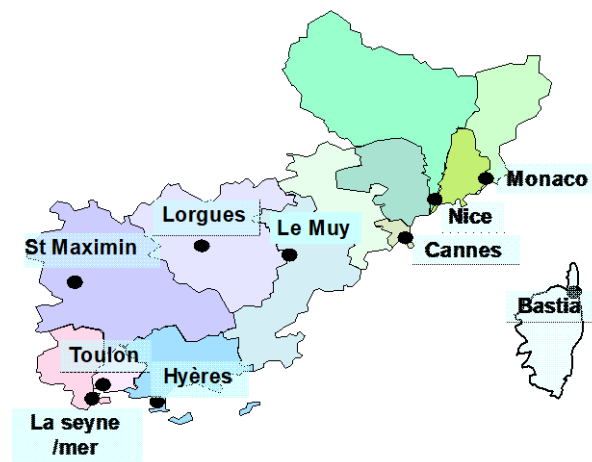
La Corse constitue par son insularité un autre cas particulier vis-à-vis de la distribution d'énergie électrique. Le réseau électrique n'est pas interconnecté au réseau de la métropole, mais il y a un important potentiel en ressources énergétiques naturelles qui a conduit cette région à diversifier ses sources d'énergie électrique. L'hydroélectricité couvre environ 22 % des besoins en électricité de l'île, deux centrales au fuel produisent 44 % de la demande. Enfin, 32 % est importé, d'Italie via un câble D.C. qui traverse la Corse pour alimenter la Sardaigne à partir de l'Italie ou pour un complément grâce à une liaison de 15 kilomètres par câble souterrain triphasé « sarco » de 150 kV, qui relie le sud de la Corse à la Sardaigne. L'éolien et les microcentrales constituent les autres sources de production d'énergie électrique. L'absence de liaison avec le réseau métropolitain et la faible capacité du réseau de distribution d'électricité sont à l'origine de fréquentes défaillances car il est difficile de contrôler la tension et la fréquence du réseau. On relève notamment d'importantes chutes de tension et une fréquence qui peut s'affaïsser plusieurs fois par an à moins de 46 Hz. Dans ce contexte le développement de l'éolien, qui constitue un potentiel important, reste difficile car les variations du vent sur l'île peuvent être influentes sur les caractéristiques électriques du réseau.

V. LES FORMATIONS DANS LE DOMAINE DU GÉNIE ÉLECTRIQUE QUI PRÉPARENT AUX BACCALURÉATS STI ET AUX BTS

Ce contexte énergétique particulier sur les académies de Nice et de Corse justifie plus encore l'intérêt des formations technologiques industrielles du domaine du génie électrique, qui préparent aux niveaux IV et III.

Sur l'académie de Nice, onze établissements, dont un privé et un autre implanté à Monaco, préparent au baccalauréat « STI génie électrotechnique ». Trois nouvelles sections ont été ouvertes depuis six ans, à l'occasion de la rénovation ou de la construction de lycées sur le département du Var : Costebelle à Hyères, M. Janetti à Saint Maximin et Val d'Argens au Muy. L'ouverture de ces nouvelles sections a entraîné une augmentation significative des effectifs en classe de première STI à la rentrée 2008 avec une augmentation de 10 %, pour un total de 300 élèves. Sur une période plus longue, ces ouvertures compensent une diminution des effectifs sur les lycées technologiques industriels « historiques » et implantés sur les grandes villes de l'académie : Nice, Toulon et Lorgues.

Sur la Corse le baccalauréat STI « génie électrotechnique » est proposé au lycée Vincensini à Bastia. Le Lycée Laetitia Bonaparte à Ajaccio propose lui une formation au baccalauréat STI « génie électronique ».



En ce qui concerne les BTS, l'académie de Nice offre au lycée Rouvière à Toulon et à Nice au lycée des Eucalyptus, une préparation au BTS Electrotechnique. En Corse, une section préparant à ce BTS a été ouverte en 2007 au lycée Vincensini. Les formations au BTS Systèmes Électroniques sont proposées dans les lycées : Apollinaire à Nice, Jules Ferry à Cannes, Rouvière à Toulon et L. Bonaparte à Ajaccio. Enfin, d'autres formations dans des spécialités périphériques aux métiers du génie électrique sont également proposées sur l'académie : IRIS au lycée de Lorgues, des Eucalyptus et à Bastia, domotique et maintenance au lycée Langevin à la Seyne sur mer, M.A.I. au lycée de Lorgues, Maintenance au lycée Jules Ferry à Cannes,

A.T.I. au lycée Apollinaire et au lycée Vincensini à Bastia.

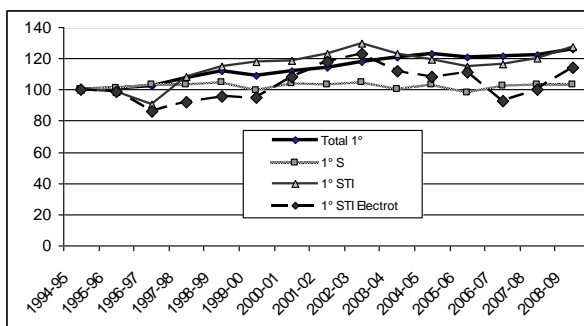
Enfin, les pôles universitaires de Toulon, de Nice Sophia Antipolis offrent des formations qui préparent à un DUT ou à des licences professionnelles dans le secteur du génie électrique.

L'offre de formation sur les deux académies de Nice et de Corse dans le domaine du génie électrique

Lycée	Ville	BAC STI	BTS
Les Eucalyptus	Nice	<input checked="" type="checkbox"/>	Electrotechnique, IRIS
Apollinaire	Nice	<input checked="" type="checkbox"/>	Syst. électroniques, ATI
Don Bosco (privé)	Nice	<input checked="" type="checkbox"/>	Maintenance Industrielle
Jules Ferry	Cannes	<input checked="" type="checkbox"/>	Syst. électroniques Maintenance Industrielle
Albert 1 ^o	Monaco	<input checked="" type="checkbox"/>	
Val d'Argens	Le Muy	<input checked="" type="checkbox"/>	
M Janetti	St Maximin	<input checked="" type="checkbox"/>	
Lorgues	Lorgues	<input checked="" type="checkbox"/>	M.A.I. IRIS
Costebelle	Hyères	<input checked="" type="checkbox"/>	
Langevin	La seyne/mer	<input checked="" type="checkbox"/>	Maintenance industrielle Domotique
Rouvière	Toulon	<input checked="" type="checkbox"/>	Electrotechnique Syst. électroniques
Vincensini	Bastia	<input checked="" type="checkbox"/>	Electrotechnique IRIS ATI
L Bonaparte	Ajaccio	<input checked="" type="checkbox"/>	Syst. électroniques

VI. L'ÉVOLUTION DES EFFECTIFS

Le graphe ci-dessous présente l'évolution des effectifs dans les classes de première sur l'académie de Nice depuis une quinzaine d'années.



Nous observons globalement une augmentation des effectifs dans la voie générale et technologique.

Dans les classes de S les effectifs restent sensiblement constants depuis 14 ans.

Pour la voie technologique industrielle les effectifs évoluent dans les mêmes proportions que pour l'ensemble des élèves accueillis dans les lycées généraux et technologiques. Cette évolution favorable résulte directement de l'apport de nouveaux élèves dans les sections de génie électrique.

VII. L'ANIMATION PÉDAGOGIQUE

Elle est organisée dans le cadre de groupes de réflexion disciplinaire (G.R.P.). Pour chaque discipline, les GRP regroupent au minimum un professeur de chaque établissement qui prépare au baccalauréat STI. Ils offrent la possibilité de développer une réflexion commune et partagée qui propose des orientations pédagogiques et l'accompagnement des formations en termes de formation et d'équipement.

Pour le GRP « électrotechnique », les travaux développés depuis plusieurs années ont d'abord concerné la mise en œuvre des centres d'intérêt et l'utilisation de supports pédagogiques communs sur les deux académies de Nice et de Corse. C'est ainsi, que nous avons choisi d'étendre le champ d'étude des élèves à la transformation d'énergie électrique en énergie thermique, ce qui a conduit à la réalisation d'une maquette pédagogique de commande d'un four qui est présenté ci-après par l'équipe pédagogique du lycée Don Bosco de Nice. Aujourd'hui et dans la perspective de l'application d'une évolution des programmes, les travaux s'attachent à intégrer dans les formations les problèmes de pollution d'énergie électrique de production et d'utilisation de cette énergie dans le respect du développement durable.

C'est dans ce cadre que : d'une part l'équipe pédagogique du lycée Jules Ferry à Cannes vous présente un T.P. sur « les contraintes engendrées sur les conducteurs par la pollution harmonique » et d'autre part les professeurs du lycée de Lorgues proposent un article sur l'éclairage et les économies d'énergie.

Enfin, les enseignants du lycée Rouvière à Toulon entretiennent depuis de nombreuses années des relations particulières avec l'Institut Français de Recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER), ils présentent un projet conduit en collaboration avec cet institut, par des élèves de BTS.

Ces productions sont significatives des travaux développés sur les académies de Nice et de Corse. Elles participent aux contributions des enseignants sur un espace pédagogique numérique académique STI accessible à l'adresse suivante :

http://www.ac-nice.fr/sti/joom_sti/index.php

Cet espace rassemble de nombreuses ressources pédagogiques et techniques, il est à disposition des enseignants.

Quelle physique appliquée pour une nouvelle STI ?

PASCAL LOOS

IA-IPR de sciences physiques

Rectorat de l'académie d'Aix-Marseille

pascal.loos@ac-aix-marseille.fr

Avertissement : L'article ne contient pas la réponse, mais essaye de poser les termes de la question. Après un rappel de l'historique récent de l'enseignement de l'électrotechnique au lycée et un rapide état des lieux, cet article a surtout pour vocation d'interpeler le lecteur : Comment doit-on faire évoluer notre discipline dans les prochaines années ? La question est d'une actualité brûlante (depuis très longtemps diront les persifleurs). Les lecteurs de la revue 3EI sont des spécialistes de l'enseignement de l'électrotechnique et, à ce titre, ils doivent prendre part au débat.

I. REPÈRES HISTORIQUES

Une étude exhaustive de l'historique de l'enseignement de l'électrotechnique en France a été réalisée par Bernard Calmettes en 1995 [1], elle est donc, malheureusement, toujours d'actualité pour la série STI génie électrotechnique.

Le baccalauréat "mathématiques et techniques" est créé en 1946. Les brevets de techniciens (BT) apparaissent en 1952 et les BTS en 1962. Les séries technologiques sont mises en place en 1968. Les filières industrielles sont précédées de la lettre F et la section électrotechnique est dénommée F3. Les programmes sont définis par un arrêté du 30 juillet 1967 et modifiés une première fois par une circulaire du 16 mai 1972.

Dans les années 1960, l'électrotechnique est considérée comme une branche "aboutie" donc vouée à la stagnation et se limite à l'étude des machines électriques. L'électronique de puissance ne concerne que les courants forts. En 1976, il n'y avait que 34 chercheurs en France [1]. Les programmes de la série F3 ont évolué régulièrement jusqu'en 1992 prenant régulièrement en compte l'évolution des technologies.

L'électronique de puissance (hacheur et onduleur) est introduite dans les programmes définis par l'arrêté du 12 juillet 1982 et le sujet proposé pour la session de 1984 crée la surprise avec des régimes non sinusoïdaux.

Le programme de 1988 introduit une partie contenant quelques notions de mécanique et d'optique. Il comporte également deux grandes nouveautés : les alimentations à découpage de type fly-Back et les premières notions sur les asservissements linéaires et leur application à la régulation de vitesse d'un moteur à courant continu.

En 1992, l'optique et la mécanique qui, faute de temps, étaient rarement traitées sérieusement, sont retirées des programmes. L'horaire des élèves diminue d'un tiers : les 5 h de cours et les 4 h de mesures et essais (3 h en première) sont remplacées par 3 h de cours et 3 h de travaux pratiques de physique appliquée.

Toutes ces réformes successives et les "toilettes" de programmes sont l'occasion d'organiser des stages de formation pour les professeurs, créant ainsi une dynamique de productions et d'échanges dont la revue 3EI est certainement l'un des avatars. Depuis la fin des années 90 les professeurs de lycée sont dans l'attente et les programmes de la filière STI sont maintenant plus âgés que les élèves.

II. LES DÉMARCHES PÉDAGOGIQUES TRADITIONNELLES

En TP, elles se veulent majoritairement inductives. **mais est-ce le cas ?**

La logique inductive est un raisonnement qui va du particulier au général. La pédagogie inductive devrait s'appuyer sur *l'inférence et sa vérification* [2]. En guise d'exemple considérons une séquence construite pour répondre à cette question au programme de 4^e du collège : **Quelle est l'influence d'une « résistance » dans un circuit électrique série ?** Afin de leur permettre de vérifier les hypothèses émises *après avoir réfléchi au choix du mot **résistance** pour désigner ces dipôles*, on propose aux élèves de construire un circuit alimenté par un générateur de tension fixe et de mesurer l'intensité du courant dans le circuit pour diverses valeurs de la résistance. Ce dernier devra "découvrir" qu'une augmentation de la résistance est la cause d'une diminution du courant. On pourra poursuivre par la recherche d'une éventuelle proportionnalité.

Mais a-t-on encore affaire à une pédagogie inductive,

- si l'enseignant fixe la règle du jeu, soit en imposant le mode opératoire, soit en fournissant un document très complet ? Dans ce cas, le rôle de l'élève se réduit à exécuter les consignes du professeur.

- Si une préparation théorique est demandée en amont ou si la réponse à la question a été préalablement donnée en cours ? L'activité de l'élève se réduit à vérifier qu'il est capable de manipuler correctement pour confirmer les dires de son professeur.

Ces deux travers peuvent d'ailleurs être cumulés et le TP n'est plus qu'un passe-temps dont les élèves, rarement dupes, s'acquittent avec plus ou moins de lenteur.

Ces dérives sont connues depuis longtemps et ont fait l'objet de préconisations de l'inspection [3] : une démarche inductive **impose** que le TP précède le cours.

Les TP-Cours, pourtant préconisés en 1^e STI depuis 1992, sont rarement observés. Les TP généralement proposés sont le plus souvent construits en 3 étapes :

- Un travail théorique préliminaire (préparation)
- Des mesures prescrites à effectuer (déroulement)
- Une présentation des résultats sous une forme imposée et une conclusion à rédiger (compte-rendu)

En cours, ce sont les pédagogies de transmission de connaissances qui dominent. Basées sur la répétition et la mémorisation, elles nécessitent que l'élève soit en possession d'une trace écrite de qualité, ce qui conduit de nombreux collègues à distribuer une grande quantité de photocopiés (plus ou moins "troués" pour maintenir la classe en éveil) car, en France, comme dans beaucoup de pays latins, on ne travaille pas son cours avec le manuel, ce dernier étant surtout le recueil d'exercices.

III. LES ÉVOLUTIONS À PRENDRE EN COMPTE

III.1. Les évolutions technologiques

Les lecteurs réguliers de cette revue sont certainement parmi les plus informés des évolutions de ces dernières années dans le domaine de l'électricité industrielle. Je ne compte pas en faire une liste mais m'intéresser aux conséquences pratiques pour nos enseignements

Les systèmes sont de plus en plus intégrés et fermés et, si nous en somme encore parfois capable, les normes de sécurité nous interdisent souvent d'y apporter des modifications. Il n'est donc guère envisageable que de travailler sur les grandeurs d'entrée, de commande et de sortie ainsi que sur les limites et la dynamique du système.

Mais cette observation doit s'accompagner du regard du physicien. Les transpositions didactiques nécessaires à nos enseignements peuvent nous amener à faire travailler les élèves sur des dispositifs artificiels, construits uniquement pour vérifier l'influence de tel ou tel paramètre. C'est peut être là que se situe la différence

fondamentale entre la physique dite "appliquée" et les disciplines technologiques.

Pour tenir compte des évolutions, nous avons abandonné l'étude des tubes à vide dans les années 1970, la physique des semi-conducteurs dans les années 1980. **Il faut donc nous poser la question de ce que nous devons abandonner dans les années 2010** (en plus du thyristor, bien sur !). C'est parfois le plus difficile. Je le constate en BTS électrotechnique : les nouveaux programmes ont ajouté des notions de mécanique et de thermiques mais, en électricité, certains enseignants continuent de traiter intégralement les contenus de l'ancien programme. Il faut dire que les sujets d'examens d'avant la réforme sont "modélisants"

III.2. L'évolution des métiers

Si l'on peut encore trouver dans les salles de travaux pratiques des machines électriques fabriquées localement par des petites sociétés qui ont toutes disparues, aujourd'hui la production des systèmes de l'électrotechnique n'est plus un artisanat. Aussi, sans remettre en cause l'importance d'une réflexion sur la modélisation des systèmes, on doit s'interroger sur la pertinence de faire effectuer à nos élèves tous les essais qui n'ont pour but que de caractériser des machines.

D'autres part, jusqu'à quel point devons nous prendre en compte la tertiarisation des activités des techniciens qui passent aujourd'hui plus de temps devant un ordinateur ou en relation clientèle que devant des systèmes techniques.

III.3. Les élèves et l'internet

III.3.a. L'ampleur du phénomène

Il est difficile d'évaluer le nombre moyen d'heures passées par nos élèves devant un écran d'ordinateur mais une chose est certaine, il est élevé et il est en augmentation. Les enquêtes sont le plus souvent réalisées sur la base des déclarations et des chiffres corrigés de diverses manières circulent dans les médias. Quelques études nous permettent cependant d'appréhender l'ampleur du phénomène :

Au Canada, le nombre d'heures des 20-24 ans devant la télévision baisse mais celui devant l'ordinateur explose avec 45 h par semaine[4]. Lors de l'étude menée à Paris par le DIESE en 2007 [5], près de 50 % des élèves de 4^e et de 3^e déclarent passer plus de 3 h par jour devant un téléviseur ou un ordinateur et c'est particulièrement le sommeil qui fait les frais des augmentations mesurées. Une étude évalue à 1 h 30 la diminution de sommeil chez nos élèves ces dernières années. Les jeunes qui vont arriver en lycée sont plus touchés: L'étude HBSC éditée en France par l'INPES [6] indique qu'en 2008, les garçons de 13 ans déclarent passer une moyenne de 6,71 h par jour devant un écran (jeux vidéo, télévision, ordinateur). La progression est énorme entre 2008 et 2002 [7]. Elle doit être rapprochée de celle du nombre d'accès à l'internet et à une connexion haut-débit : plus de 15 % par an. En mars 2009, on dénombre 16 millions

de foyers ayant une connexion à l'internet et 30 millions de personnes ayant accès à domicile à une connexion haut débit [8]. Enfin, une étude canadienne [9] montre que les jeunes des milieux défavorisés passent davantage de temps devant un écran que les autres.

III.3.b. Conséquences pédagogiques

On peut conclure des études ci-dessus que les actuels élèves de lycée inscrits en STI et en STS industrielles passent déjà beaucoup de leur temps libre devant un écran d'ordinateur et que cette durée augmentera encore fortement dans les années à venir.

Les conséquences se font déjà sentir sur le travail à la maison et sur la diminution de la capacité d'écoute des élèves en classe, particulièrement lors des premières heures de la matinée et de l'après midi.

Mais au-delà des problèmes de répartition du temps disponible, d'autres effets sont à considérer :

- **L'accès aux sources est simplifié** : Lorsqu'une question se pose, le premier réflexe n'est plus de se rendre au CDI ou à la bibliothèque ou de rechercher dans un quelconque ouvrage mais de lancer une recherche avec quelques mots clés bien choisis. Il ne faudrait pas penser que seul nos élèves sont touchés par ce phénomène. Pour s'en convaincre, il suffit de regarder la "bibliographie" de cet article.
- **La mutualisation** du travail à la maison est souvent de mise. Des groupes d'élèves se partagent le travail et s'échangent les résultats. Les forums permettent de relayer les questions posées par le professeur
- **Le téléchargement** permet à chacun de disposer du cours qui lui semble le plus clair. Certains élèves ne prennent pas de note en classe car ils ont déjà trouvé un cours qui leur semble de meilleure qualité sur la toile.
- **Les outils numériques** : traitements de textes, tableurs, et même certains logiciels de simulation sont accessibles à la maison.

Je laisse le soin au lecteur de compléter cette liste avec ses observations personnelles.

III.4. L'évolution des moyens d'enseignement.

Pour la deuxième année consécutive nous proposons un stage "tableau blanc interactif" au plan de formation académique de sciences physiques. Il succède à des stages concernant l'ExAO, les caméras numériques ou les logiciels pour les sciences physiques. L'ordinateur est devenu banal au point que l'on commence à voir des élèves venir avec leur portable en séance de travaux pratiques. Paradoxalement, la physique appliquée qui était en pointe dans les années 1990, semble maintenant dépassée par les sections scientifiques. Il faut dire que l'option MPI en seconde et la présence d'ExAO dans les sujets de l'évaluation des capacités expérimentales au baccalauréat S à été un formidable aiguillon. Dans ces

classes, l'oscilloscope est en passe d'être supplanté par des systèmes d'acquisition couplés à des ordinateurs.

Lorsque les outils changent, les pratiques doivent également changer.

IV. LES PISTES À EXPLORER

De manière artificielle, je vais séparer en 3 parties les quelques pistes de réflexions, mais tout est évidemment inextricablement lié. Les deux derniers points concernant les démarches pédagogiques et l'utilisation des outils numériques font ou feront l'objet de réflexions et d'expérimentations au sein de groupes de travail académiques.

IV.1. Les nouveaux contenus

Les avis de mes collègues du lycée et du supérieur vont presque tous dans le même sens : **il faut une physique appliquée plus généraliste et à plus large spectre que celle des programmes actuels**. Il faut passer de l'électricité théorique à la physique appliquée. Et surtout, il faut arrêter de piétiner les plates bandes de nos collègues de sciences et techniques industrielles.

Mon avis **personnel** est qu'il serait intéressant d'avoir un seul programme de sciences physiques pour toutes les filières technologiques industrielles et de laboratoire représentant environ 60 % du volume et 2 modules complémentaires de physique ou de chimie pour permettre une légère différenciation. C'est un choix de ce type qui a été fait pour les programmes de sciences des baccalauréats professionnels industriels [10].

Pour la constitution de ce tronc commun, se pose alors la question : Que doit savoir en 2010 un "honnête bachelier technologique" (au sens "honnête homme" du XVIII^e).

Sans entrer dans les détails d'un éventuel programme, il semble indispensable d'y inclure un bloc "énergie" comme actuellement en première S [11] auquel on pourrait adjoindre un bloc "transmission de l'information". L'évolution temporelle des systèmes qui est au cœur de l'actuel programme de terminale S devrait également être pris en compte mais en privilégiant une approche concrète uniquement adossée à l'observation et à la mesure **et laissant de côté la prévision et le calcul**.

Pour la filière industrielle, des modules complémentaires à programmes d'établissement pourraient être conçus sur la base d'un cahier des charges suffisamment détaillé pour permettre la conception d'une épreuve nationale. Il serait, par exemple, possible de proposer un choix de un ou deux modules parmi : *gestion de l'énergie, ingénierie mécanique, métiers de la construction, mise en œuvre des matériaux et réseaux d'information et de communication*, de manière à pouvoir utiliser les infrastructures existantes.

IV.2. Les démarches pédagogiques

Si les inspections générales de l'ensemble des disciplines scientifiques préconisent aujourd'hui les démarches pédagogiques constructivistes (main à la pâte en primaire, démarches d'investigation au collège), c'est parce qu'elles sont efficaces ! "*Le constructivisme n'est ni une mode, ni une doctrine. [...] Une "pédagogie constructiviste" n'est rien d'autre que la prise en compte du caractère incontournable de la construction active des savoirs.*" [12]. Les élèves qui ont connu la réforme de l'enseignement des sciences à l'école primaire puis celle du collège, entrent en classe de seconde au moment où paraît ce numéro, ils sont donc à nos portes.

L'an prochain, des professeurs de physique appliquée de l'académie d'Aix-Marseille vont concevoir et tester en classe de première STI électronique et électrotechnique

- Des démarches d'investigation pour les séances de TP de classe de première.
- Une progression construite s'appuyant sur un projet servant de fil directeur : fabrication de robots en électronique et véhicules électriques en électrotechnique.

Ces expérimentations pédagogiques s'ajoutent à toutes celles prévues en enseignement de détermination MPI en classe de seconde qui s'appuient également sur un projet de manière à proposer un travail plus ambitieux aux élèves.

IV.3. Les outils numériques

Le Danemark vient d'autoriser l'utilisation d'internet pour les examens. Dans combien de temps suivrons-nous cet exemple ? La question n'est donc plus de savoir si nos élèves doivent utiliser des logiciels pour traiter les données, tracer les courbes, résoudre des équations ou simuler des circuits mais elle est de savoir lesquels nous pouvons et/ou nous devons utiliser à chaque niveau d'enseignement.

Les tableurs-grapheurs sont utilisés par tous les élèves de la série scientifique pour l'évaluation des capacités expérimentales et doivent donc, de fait, être introduits à tous les niveaux et pour toutes les séries STI et STL. Notre choix se porte sur la suite *Open Office 3*, logiciel libre qui permet maintenant la gestion des nombres complexes.

Une autre piste que nous allons explorer : des équipes d'enseignants vont proposer à des élèves de première STI **volontaires** une formation complémentaire avec les logiciels PSIM (utilisable gratuitement en version limitée) et SCILAB (logiciel libre) et leur proposer régulièrement de traiter intégralement ou en partie les exercices proposés avec ces outils. Le but est de constituer des groupes de "pionniers" qui pourront ensuite être les moniteurs de leurs condisciples en TP. Cette expérimentation est ambitieuse (et son résultat incertain !) car le logiciel SCILAB fonctionne à l'aide de scripts et non à l'aide d'une interface graphique.

Cependant, une bibliothèque de scripts et quelques notions de syntaxe devraient permettre de l'utiliser rapidement.

V. CONCLUSION

Cet article soulève plus de questions qu'il n'apporte de réponses mais sa vocation est davantage de provoquer la réflexion. **Si ce n'est pas nous qui réfléchissons à l'avenir de nos enseignements, qui le fera ?** J'ai l'espoir qu'il sera suivi de nombreuses contributions de lecteurs de la Revue 3EI qui donneront leur avis de spécialistes ou qui nous feront part de leurs expérimentations pédagogiques et des résultats qu'ils en tirent.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] : Bernard Calmettes - Thèse de didactique des sciences : <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/27/85/52/PDF/These.pdf>
- [2] Britt-Mary BARTH, L'apprentissage de l'abstraction – Retz – Janvier 2001
- [3] : <ftp://ftp.ac-toulouse.fr/pha/ipr/jj1.doc>
- [4]: Profil du temps passé devant un écran par les adultes canadiens – juin 2008
<http://www.statcan.gc.ca/pub/82-003-x/2008002/article/10600-fra.pdf>
- [5] <http://infodoc.santenpdc.org/wp-content/uploads/2009/01/rapportdiese20072008.pdf>
- [6] La santé des élèves de 11 à 15 ans en France, Septembre 2008 - dossier de presse - page 10
<http://www.inpes.sante.fr/70000/dp/08/dp080902.pdf>
- [7] La santé des élèves de 11 à 15 ans en France, 2002 - Rapport - page 126
http://www.hbsc.org/countries/downloads_countries/France/FrenchNatReport0102.pdf
- [8] L'audience de l'Internet en France - Mars 2009 – Médiamétrie
- [9] http://www.recherche-sainte-justine.qc.ca/fr/medias/salleepresse/41.jsessionid=ayzArLP5Qu_7
- [10] programmes de la voie professionnelle
http://eduscol.education.fr/D0048/voie_prof_math_sciences.pdf
- [11] B.O. spécial n°7 du 31 août 2000
- [12] Philippe Perrenoud : http://www.alter-education.org/version_noire/constructivisme.htm

Installation photovoltaïque académique

Patrick LEFORT

IA-IPR STI Académie d'Aix-Marseille
Rectorat de l'Académie d'Aix-Marseille

Résumé : pour équiper les sections menant au baccalauréat génie électrotechnique et génie énergétique de l'Académie d'Aix-Marseille via un financement Régional il a fallu se placer dans une perspective régionale et associer l'Académie de Nice à la démarche.

Cet article décrit la procédure utilisée et le contenu du marché.

A / Constat

À la date de début 2006, quelques établissements de l'Académie s'étaient dotés de systèmes photovoltaïques de production d'énergie électrique.

Certains sur projet, tel le lycée de l'Estaque à Marseille avec un financement européen, d'autres sur crédits propres comme à Philippe de Girard à Avignon pour la section de STS électrotechnique ou le lycée Pierre Gilles de Gennes à Digne pour le baccalauréat génie électrotechnique.

À la même époque un nouveau lycée technologique sortait de terre à Manosque et la carte des formations de ce lycée comportait une section de génie électrotechnique. Il est à remarquer que la construction de ce lycée s'est déroulé en même temps que les travaux sur la réforme des baccalauréats technologiques et l'orientation fut prise de prévoir une filière fusionnant l'énergétique et l'électrotechnique.

Ce lycée moderne - le lycée des Iscles¹ - a donc été prévu dès sa création, avec un dispositif de production d'eau chaude sanitaire solaire, une pompe à chaleur, une pile à combustible, un champ de 20 m² de panneaux photovoltaïques connectés au réseau. Les contraintes architecturales n'ont pas permis l'implantation d'une éolienne.

Cette installation de panneaux photovoltaïques a servi de modèle pour l'élaboration du cahier des charges régional.

Le tableau ci-dessous fait le bilan des installations des académies de Nice et Aix-Marseille courant 2006.

B / Calendrier et modalités de l'opération

Courrier aux proviseurs pour solliciter l'inscription de ce projet au PREL (Plan régional d'équipement des lycées) en décembre 2006.

Élaboration du cahier des charges en mars-avril 2007.

Délibération du conseil Régional en date du 29 juin 2007 autorisant une procédure d'appel d'offre ouvert pour un

marché à bons de commande. Enveloppe annuelle maximale de 600 000 € HT renouvelable 2 fois.

Publicité de l'appel d'offre le 17 septembre 2007 pour une remise des plis au plus tard le 12 novembre 2007.

4 candidatures sont reçues, l'une ne pourra être étudiée pour non respect du règlement de consultation.

L'ouverture des plis des trois offres restantes fait apparaître un dépassement de l'enveloppe estimée. Une négociation s'engage alors entre la Région et les trois fournisseurs.

La négociation aboutit en juin 2008 avec la désignation de la société ERM de Carpentras pour un montant unitaire de 20 600 € TTC (sans l'option unité de stockage).

Les bons de commandes sont émis en septembre 2008 et les premières installations débutent en janvier 2009. Les 14 installations seront terminées fin mars 2009.

D'ores et déjà, les établissements faisant partie de la seconde tranche ont été sollicités pour inscrire la demande d'une installation photovoltaïque au PREL 2009, dossier qui a été fourni à la Région en décembre 2008.

Les installations pourraient débiter à la rentrée 2009.

C / Cahier des charges Régional

1. OBJET DE L'OFFRE :

Le présent marché porte sur la fourniture et l'installation de systèmes d'étude de l'énergie électrique d'origine photovoltaïque dans 23 lycées de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur disposant de la filière électrotechnique. La première phase devrait concerner les 14 établissements suivants :

- Lycée Polyvalent Vauvenargues – Aix en Provence (13)
- Lycée Technique Pasquet – Arles (13)
- Lycée Polyvalent Jean-Henri Fabre – Carpentras (84)
- Lycée Technique Pierre-Gilles de Gennes – Digne-les-Bains (04)
- Lycée Polyvalent M.M. Fourcade – Gardanne (13)
- Lycée Polyvalent Alphonse Benoit – L'Isle-sur-Sorgues (84)
- Lycée Polyvalent Antonin Artaud – Marseille (13)

¹ Iscle : banc de sable au milieu ou au bord de la Durance

- Lycée Professionnel l'Estaque – Marseille (13)
- Lycée Technique Adam de Craponne – Salon-de-Provence (13)
- Lycée Technique Léonard de Vinci – Antibes (06)
- Lycée Technique Jules Ferry – Cannes (06)

- Lycée Polyvalent Paul Langevin – La Seyne-sur-Mer (83)
- Lycée Technique de Lorgues – Lorgues (83)
- Lycée Technique Rouvière – Toulon (83)

Certains lycées pourront être équipés à terme de deux systèmes.



INSTALLATIONS PHOTOVOLTAIQUES

académie de rattachement		Aix		Nice		Demande PREPL 2007	Commentaires	Nbre systèmes	
Nom	Ville	Génie électrotechnique	Génie énergétique	BTS électrotechnique	Génie électrotechnique				BTS électrotechnique
PUB	Vauvenargues	AIX	X				Contraintes "bâtiment historique"	1	
PUB	Pasquet	ARLES	X				Contraintes "bâtiment historique"	1	
PUB	Ph.Girard	AVIGNON	X	X			1 seul système possible car plateaux mitoyens - ressource dans le domaine - Déjà équipé d'une production "site isolé"	1	
PUB	Fabre	CARPENTRAS	X					1	
PUB	G. de Gennes	DIGNE	X				Déjà équipé d'une installation de faible puissance < 1 kW connectée réseau	1	
PUB	Fourcade	GARDANNE	X	X			2 systèmes car des locaux disjoints - rez de chaussée et étage, non superposés-	2	
PUB	Benoit	ISLE/SORGUES	X				Contraintes "bâtiment historique"	1	
PUB	La Méditerranée	LA CIOTAT	X					1	
PUB	Les Iscles	MANOSQUE	X				Lycée neuf, déjà équipé d'une installation	0	
PUB	Artaud	MARSEILLE	X	X			1 seul système possible car plateau non commun mais mitoyen	1	
PUB	Diderot	MARSEILLE	X					1	
PUB	L.P. L'Estaque	MARSEILLE	X				Déjà équipé d'une installation de faible puissance < 1 kW connectée réseau ne répondant pas au cahier des charges	1	
PUB	Perrin	MARSEILLE	X	X			2 systèmes car flux de terminale sur 2 divisions	2	
PUB	Rempart	MARSEILLE	X	X			2 systèmes car des locaux disjoints - rez de chaussée et étage, non superposés - Contraintes "bâtiment historique"	2	
PUB	Langevin	MARTIGUES	X					1	
PUB	Craponne	SALON	X					1	
PRI	St.Eloi	AIX	X					1	
PRI	St.J.B. de la Salle	AVIGNON	X	X			1 seul système possible car plateau non commun mais mitoyen Contraintes "bâtiment historique"	1	
PRI	Don Bosco	MARSEILLE	X	X			1 seul système possible car plateau non commun mais mitoyen Contraintes "bâtiment historique"	1	
PRI	Caucadis	VITROLLES	X					1	
PUB	L. De Vinci	ANTIBES			X		Demande PRELP formulée sous la forme Panneaux solaires	1	
PUB	J. Ferry	CANNES		X				1	
PUB	Costebelle	HYERES		X				1	
PUB	Langevin	LA SEYNE/MER		X				1	
PUB	de Lorgues	LORGUES		X				1	
PUB	Eucalyptus	NICE		X	X		2 systèmes car des locaux non mitoyens, étages différents, non superposés	2	
PUB	G. Apollinaire	NICE		X				1	
PUB	Rouvière	TOULON		X	X		2 systèmes car des locaux non mitoyens et flux Terminale sur 2 divisions	2	
PRI	Don Bosco	NICE		X				1	
Nbre de format.		19	1	7	8	1	2	33	
Nbre de sites		20		9					
		29							

2. FONCTIONNALITES REQUISES

2.1. Spécifications générales

Le système devra permettre les trois modes de fonctionnement suivants :

- * utilisation locale de la totalité de la production d'électricité,
- * revente totale de la production d'électricité,
- * utilisation locale d'une partie de la production d'électricité et revente du surplus produit.

Aucune intervention, autre que de maintenance conduite par des personnels qualifiés, ne sera effectuée sur le champ des panneaux (pas d'activités pédagogiques).

2.2. Spécifications particulières

Concernant les grandeurs minimales demandées (puissance,...), un écart de 10% sera toléré dans la réponse des candidats.

Le générateur photovoltaïque de puissance crête supérieure à 1500 W (puissance monophasée disponible en aval de l'onduleur) sera constitué, sur le plan électrique, des composants suivants :

2.2.1. Modules photovoltaïques :

- * Leur quantité sera adaptée à la puissance crête exigée et les cellules seront de type silicium polycristallin ou mono cristallin,
- * Les éléments, nécessaires à la fixation des modules photovoltaïques (châssis, structures, etc.), seront traités anticorrosion,

- * Seront fournis les dispositifs de connections (connecteurs, boîtes de jonction éventuelles (IP54 mini), etc.).

2.2.2. Câblage partie courant continu et protection :

- * Câble simple à double isolation ou câble simple à simple isolation dans un conduit spécifique,
- * Protection par fusibles et par diodes de découplage (éventuellement),
- * Isolement par sectionnement bipolaire ou mieux par interrupteur/sectionneur.

2.2.3. Onduleur monophasé :

- * Il devra satisfaire aux normes et réglementations permettant une réinjection sur le réseau,
- * Il devra travailler au point optimum de puissance quel que soit l'ensoleillement,
- * Il devra comporter un contrôleur d'isolement côté DC permettant de prévenir d'un défaut éventuel d'isolement (entre chaque polarité et la masse),
- * Il devra permettre le recueil des informations par liaison série (RS 485, RS 232 ou USB) et leur exploitation (protocole ouvert).

2.2.4. Câblage partie courant alternatif :

- * Protection de l'onduleur en amont et du circuit d'utilisation en aval par disjoncteur différentiel 30 mA,
- * Protection contre les effets de la foudre par parafoudre.

2.2.5. Compteurs d'énergie

Trois compteurs électroniques permettront de mesurer les transferts d'énergie :

- * Comptage de l'énergie électrique solaire injectée par le producteur,
- * Comptage de l'énergie électrique soutirée au réseau,
- * Comptage de l'énergie électrique solaire consommée par le producteur.

2.2.6. Acquisition de données, affichage et communication

Seront recueillies à minima les informations suivantes :

- * Ensoleillement,
- * Température extérieure,
- * Température des panneaux,
- * Tensions continues aux bornes des panneaux,
- * Tension alternative en aval de l'onduleur,
- * Puissances instantanées et cumulées, courants instantanés, mémorisés sur une période de 1 an minimum.
- * Seront affichées les puissances instantanées générées par les panneaux (afficheurs grand format chiffres hauteur > 150 mm).
- * Seront disponibles à distance et consultables sur Internet ces mêmes données via un serveur Web. Des copies d'écran devront être fournies, correspondant à chacune des variables et fonctions disponibles.

2.2.7. En option, unité de stockage d'énergie permettant une alimentation secours du site comprenant :

- * Jeu de batteries de stockage, technologie au plomb, stationnaire, 24 V, de capacité supérieure ou égale à 200 Ah avec bac de rétention,
- * Onduleur chargeur adapté assurant la charge du jeu de batteries et la transformation de la tension continue 24 V en tension alternative monophasée 240 V 50 Hz,
- * Composants en coffret assurant la commutation entre les sources et la protection des circuits et générateurs.

3. NORMES ET SECURITE

L'installation des matériels sera soumise au respect des normes de l'industrie photovoltaïque et des normes relatives aux installations électriques basse tension, notamment :

Ici figurent les normes NF et CEI applicables.

Il devra être également respecté les textes réglementaires et guides suivants :

Ici figurent les textes réglementaires et guides applicables.

Dont notamment :

- * Le Guide de l'ADEME (2004) : systèmes photovoltaïques raccordés au réseau – Guide de rédaction du cahier des charges techniques de consultation à destination du maître d'ouvrage,

4. LIVRAISON ET INSTALLATION

4.1. Préparation de l'installation sur site

L'étude de faisabilité est à la charge du titulaire. Il pourra utilement se rapprocher du chef des travaux de chaque établissement.

L'implantation des modules photovoltaïques devra :

- * se fondre le plus possible dans le paysage
- * respecter les contraintes architecturales et réglementaires de chaque site (en toiture - non intégrée -, en terrasse, en auvent, ou en façade),
- * être optimisée en site (SUD) et azimut ($45^\circ \pm 10^\circ$).
- * se faire au plus près possible des laboratoires des sections du Génie Électrotechnique concernées.

La constitution des dossiers de demande d'autorisation de travaux auprès des autorités compétentes et leur suivi, sont à la charge du titulaire.

4.2. Livraison

- * Les opérations d'installation seront précédées de la mise en place d'un PPSPS en coordination avec le chef d'établissement.
- * Les livraisons devront intervenir en une seule fois, à la date qui sera communiquée au titulaire
- * Elles auront lieu avec présence sur site d'une personne représentant le titulaire.
- * Cette personne aura en charge la livraison, l'installation, le montage, la configuration, le réglage et le pointage des matériels.

Aucune livraison directe en provenance d'un fournisseur du titulaire ne sera acceptée en dehors des dates communiquées et sans la présence d'un représentant du titulaire (livraison par messagerie par exemple). En cas de livraison dans le cadre d'un SAV ou d'une livraison d'un reliquat, un représentant du titulaire devra être présent sur site pour s'assurer de la bonne marche de la prestation et pointer le matériel livré.

- * Le titulaire devra prendre ses dispositions quant aux moyens de déchargement nécessaires et de mise en place.
- * Le titulaire devra procéder à l'évacuation des emballages perdus (cartons, plastiques, palettes...) ainsi qu'au nettoyage des matériels installés et des salissures provoquées lors des installations (gravats).

5. FORMATION

Dans la prestation, le titulaire devra prévoir une aide à la prise en main des équipements auprès des enseignants concernés de chaque site.

Le titulaire devra indiquer dans son mémoire technique, le nombre de jours nécessaires ainsi que le nombre maximal de personnes intéressées (un minimum de 4 personnes par site est à prévoir).

6. CONTROLE DE CONFORMITE

Le titulaire du marché devra remettre à la Région un certificat de conformité de machines installées, délivré par un organisme de contrôle agréé.

L'organisme de contrôle devra attester de la conformité de chaque machine dans son environnement définitif (avec raccordements électriques, fixation, etc.).

Le choix de l'organisme de contrôle est laissé à l'initiative du titulaire.

Toutes les modifications qui pourraient être demandées soit par l'organisme de contrôle (pour non-respect des normes), soit par la Région (pour non-respect du cahier des charges) seront à la charge du fournisseur.

7. DOCUMENTATION

La documentation fournie par le titulaire, à chaque lycée, à la fin de sa prestation sera rédigée en français et comprendra :

- * une notice technique du système complet, comprenant l'ensemble des documentations des composants, en français, ainsi que l'ensemble des plans de recollement et de câblage sous forme informatique (Trace Elec Pro ou SEE 3000expert ou autre logiciel de schéma),
- * la notice d'utilisation en français,
- * des applications pédagogiques niveau terminale génie électrotechnique et BTS électrotechnique,
- * les schémas électriques,
- * un manuel opérateur,
- * un guide de maintenance préventive comprenant notamment :
- * la périodicité d'intervention selon les organes,

- * la documentation des différents composants renouvelables,
- * les consommables préconisés.
- * le certificat de conformité délivré par l'organisme de contrôle.

Un exemplaire type complet de cette documentation (hors certificat de conformité) sera fourni à la Région dès notification du marché.

8. CONDITIONS DE GARANTIE ET SAV

8.1. Délai minimum : 1 an

8.2. Les délais d'intervention au titre du SAV (en ou hors période de garantie) seront précisés et ne pourront être supérieurs à 72 heures (samedi, dimanche et jours fériés exclus).

D / INSTALLATIONS

Suivant les établissements et les contraintes architecturales, les installations se sont faites en toiture par superposition, en terrasse ou en brise soleil en façade. Ainsi au lycée de Manosque les panneaux ont été placés sur la terrasse qui sera végétalisée ultérieurement ce qui rend l'installation invisible de la cour. Les établissements situés dans des périmètres historiques ont nécessité pour l'installateur plus de négociations auprès des communes et de la DDE.



Photo 1 : lycée des Iscles

L'installation des panneaux n'a pas été prévue pour être accessibles aux élèves.

Les installations intérieures sont soit posées sur des châssis mobiles soit fixées au mur.



Photo 2

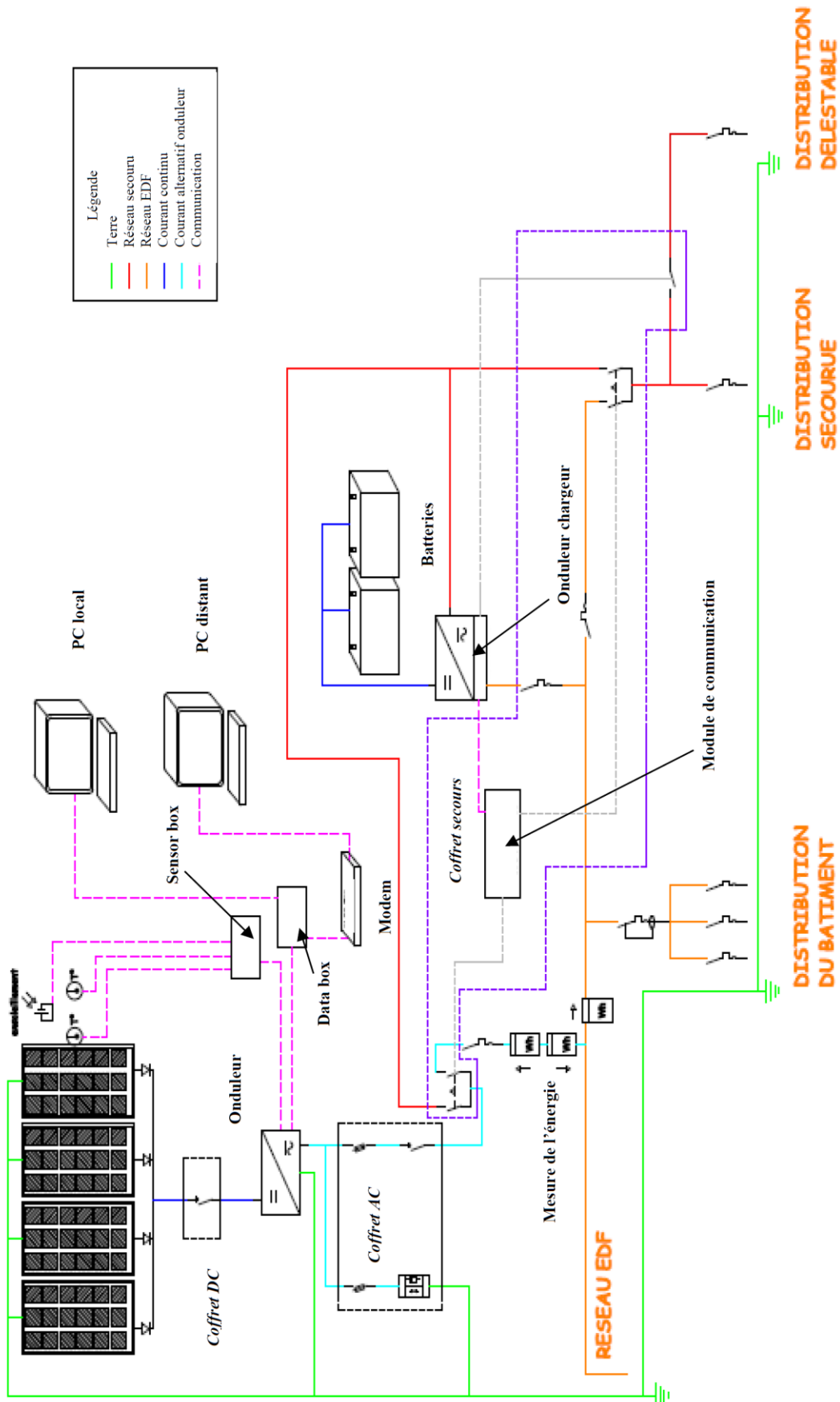


Schéma 1 : Structure synoptique de l' installation
 Sur ce schéma ne figure pas l' affichage de la production, faite sur un écran LCD grand format

Réseau électrique haute qualité

Julien SERRES, Patrick DUBOIS, Christophe JAUNAY et Sophie ESCOLANO

Lycée Marie Madeleine Fourcade,
Avenue du groupe Manouchian BP 128
13420 GARDANNE

Résumé : En milieu industriel, de plus en plus de charges polluantes (éclairage, ordinateurs...) sont installées, mais paradoxalement de nombreux équipements sensibles ont besoin d'être alimentés par un réseau de haute qualité. L'objet de cet article collectif, mêlant physiciens et électrotechniciens, est de montrer comment nous abordons avec nos étudiants de section de technicien supérieur les différents aspects de la pollution harmonique : les causes, les conséquences, et les remèdes.

Mots clés : Qualité de l'énergie électrique, Pollution harmonique, Compensateur actif.

Abréviations : GE (Groupe Electrogène), H_n (Harmonique de rang n),

THD (Taux de Distorsion Harmonique - Total Harmonic Distorsion)

Notations :

I_n : valeur efficace de l'harmonique de courant H_n

φ_n : déphasage de l'harmonique de courant H_n par rapport au fondamental de la tension simple $v_1(t)$.

f_n : fréquence de H_n ($f_1 = 50\text{Hz}$)

F_p : facteur de puissance

THD I% : Taux de distorsion harmonique en courant

THD V% : Taux de distorsion harmonique en tension

- d'un groupe électrogène (OLYMPIAN™ GEP30-1) de 30 kVA,
- d'un compensateur actif SineWave triphasé (MGE UPS SYSTEMS™) de calibre 20 A,
- d'un analyseur de réseau FLUKE™ 434/435.

L'organisation de cet article vise à décrire la façon dont nous traitons les thèmes liés à la pollution harmonique au cours des deux ans. La partie II présente les sources de la pollution harmonique. La partie III présente des bilans sur la qualité de l'énergie électrique consommée par notre atelier alimenté, soit par le réseau électrique, soit par un groupe électrogène (GE) de secours. La partie IV présente une solution de dépollution par un compensateur actif. Nous avons constaté que l'introduction des problèmes liés à la pollution harmonique et des techniques de dépollution dès le début du cycle de formation des techniciens, facilite leur étude sur un plan plus théorique, en physique appliquée et en mathématiques.

I. INTRODUCTION

En première et terminale, les élèves sont initiés aux différentes formes de signaux électriques : sinusoïdaux, continus, créneaux, et les harmoniques sont à peine abordés. En Section de Technicien Supérieur, les étudiants sont confrontés à toutes formes de signaux en régime périodique.

L'étude de régimes périodiques non-sinusoïdaux nécessite de maîtriser un outil mathématique complexe basé sur le développement en série de Fourier qui est abordé en mathématiques en milieu de première année (mars). L'étude de la pollution harmonique est traitée conjointement par plusieurs disciplines : les enseignements d'électrotechnique, de physique appliquée et les essais de systèmes.

L'atelier d'essai de systèmes du lycée Fourcade est bien doté pour l'étude des thèmes relatifs à la distribution de l'énergie électrique et à la qualité de l'énergie électrique (cf. Repères pour la formation en BTS électrotechnique). Tous les essais de système se font dans l'atelier d'électrotechnique, comme préconisé dans le référentiel.

Nous disposons dans cet atelier :

- de multiples charges non-linéaires (systèmes d'éclairage, ordinateur, variateurs, alimentation sans interruption...)

II. LA POLLUTION HARMONIQUE

II.1. Les causes de la pollution harmonique

Lorsque l'installation est raccordée au réseau de distribution électrique, on fait généralement l'hypothèse d'une tension d'alimentation sinusoïdale. La pollution harmonique est générée par des charges absorbant un courant d'intensité non-sinusoïdal. Elles peuvent être de deux natures : soit des charges non-linéaires intrinsèques (e.g. tube fluorescent compensé sur Fig. 1(b), ampoule fluocompacte sur Fig. 1(c), ordinateur sur Fig. 1(d)), soit linéaires mais couplées à un variateur ce qui les rend non-linéaires (e.g., ampoule à filament + gradateur [1], moteur triphasé + variateur [2]).

Lorsque l'installation est raccordée à une source d'énergie autonome (e.g., un groupe électrogène), on ne peut plus faire l'hypothèse d'une tension purement sinusoïdale. La pollution harmonique est alors aussi bien générée par la source que par les charges non-linéaires. Dans un tel cas de figure, il faut mettre en œuvre une

technique de dépollution pour restaurer la qualité du réseau (e.g., un compensateur actif [2]), notamment pour éviter des dysfonctionnements au niveau des équipements sensibles (papillotement des luminaires, ordinateurs, serveurs...).

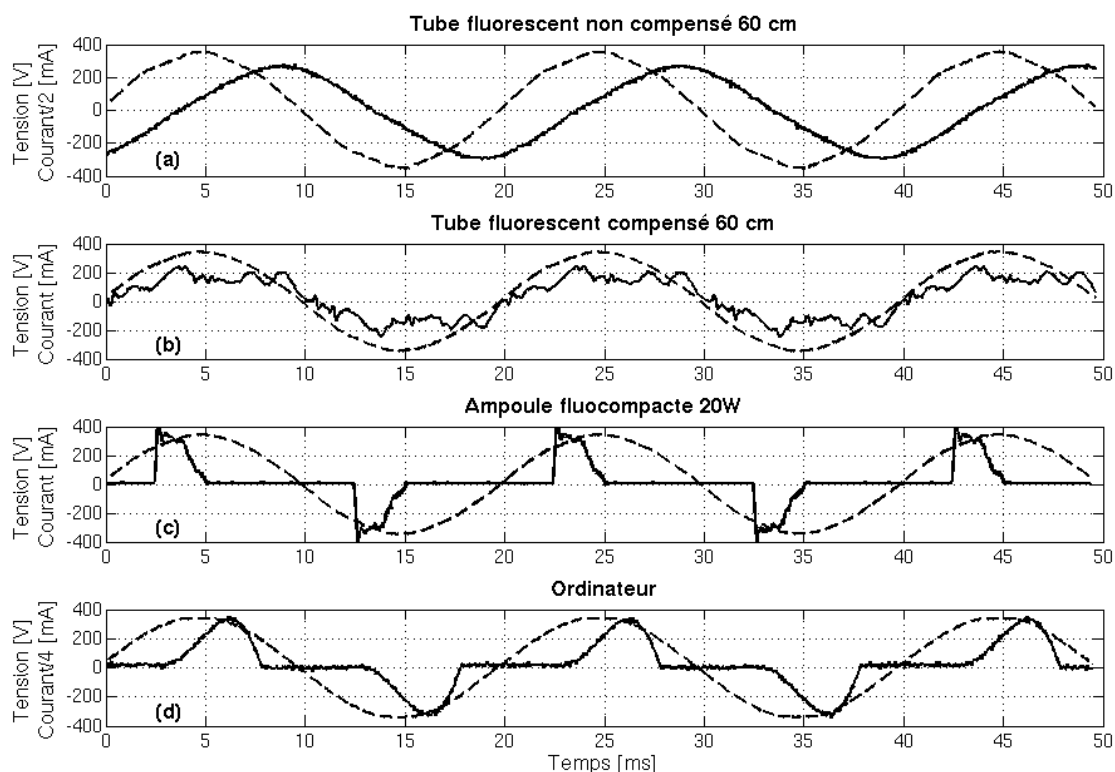


Figure 1 : Types de charges (tension en pointillés: intensité en trait continu). (a) Tube fluorescent non compensé 60 cm. (b) Tube fluorescent compensé 60 cm. (c) Ampoule fluocompacte 20 W. (d) Ordinateur de bureau.

II.2. Les critères de qualité d'un réseau

II.2.a. Indicateur de qualité d'un générateur

Lorsqu'une installation est reliée au réseau électrique, on fait généralement l'hypothèse d'une tension simple purement sinusoïdale : $v(t) = V_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t)$ avec $V_1 = 230 \text{ V}$; $f_1 = 50 \text{ Hz}$, qui est prise comme référence de phase. L'intensité non-sinusoïdale du courant de ligne $i(t)$ (e.g. sur la Fig. 1(b-d)) est périodique de période 20 ms, elle peut donc se décomposer en série de Fourier :

$$i(t) = I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t - \varphi_1) + \dots + I_n \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_n \cdot t - \varphi_n) + \dots \quad (1)$$

L'intensité du courant $i(t)$ s'écrit comme une somme infinie de fonctions sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale f_1 . Les termes de cette somme sont qualifiés de composantes harmoniques (notés H_n).

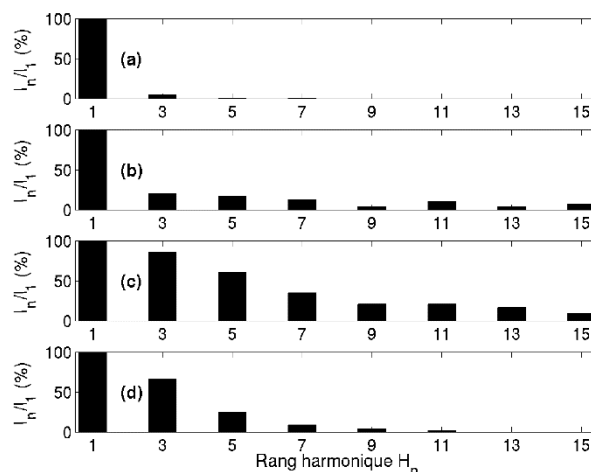


Figure 2 : Signature spectrale en courant des charges représentées sur la figure 1.

La figure 2(a) montre qu'un tube fluorescent non compensé est non polluant car le spectre fait seulement apparaître l'harmonique H_1 . La Fig. 2(b) montre qu'un tube fluorescent compensé génère peu d'harmoniques de H_3 à H_{15} en comparaison d'une ampoule

fluocompacte domestique de 20 W (Fig. 2(c)). Les ordinateurs de bureau absorbent des courants qui contiennent essentiellement les harmoniques H_3 et H_5 (Fig. 2(d)). Chaque charge non-linéaire possède une signature spectrale qui lui est propre, ce qui permet, au sein d'une installation électrique, de facilement identifier la nature des émetteurs de pollution harmonique.

II.2.b. Valeur efficace d'une grandeur non-sinusoidale

La valeur efficace I de $i(t)$ est donnée par :

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2 + \dots} \quad (2)$$

La valeur efficace de l'intensité des courants harmoniques I_H regroupe tous les harmoniques autres que le fondamental (H_1), on la calcule de la manière suivante :

$$I_H = \sqrt{I^2 - I_1^2} \quad (3)$$

Dans la pratique, le calcul de cette somme dépend de la bande passante de l'appareil de mesure utilisé.

II.2.c. Les indicateurs de qualité de l'énergie électrique

Le taux de distorsion harmonique en courant $THD I\%$ (cf. (4)) est un indicateur de la qualité de la forme d'onde de courant pour quantifier l'émission de pollution harmonique d'un récepteur.

$$THD I(\%) = 100 \times \frac{I_H}{I_1} \quad (4)$$

Le niveau d'émission en BT est fixé par la norme CEI 61000-3-2 pour les appareils consommant un courant d'intensité inférieure 16 A et une puissance supérieure à 75 W, La norme CEI 61000-3-12 s'applique aux appareils consommant un courant par phase d'intensité comprise entre 16 A et 75 A. La norme CEI 61000-3-4 pour ceux consommant un courant d'intensité supérieure à 75 A [3].

Le taux de distorsion harmonique en tension $THD V\%$ (cf. (5)), est un indicateur de la qualité de la forme d'onde de tension.

$$THD V(\%) = 100 \times \frac{V_H}{V_1} \quad (5)$$

Une forte impédance de ligne ou de source, conjuguée à des courants harmoniques importants, est la cause de l'augmentation du $THD V(\%)$ au niveau des récepteurs. Les normes CEI 61000-2-2 et EN 50160 définissent les niveaux des harmoniques de tension sur les réseaux publics BT [3]. Le taux global de distorsion en tension en BT doit rester inférieur à 8%.

Le facteur de puissance $F_p = P/S$ quantifie le taux d'utilisation d'un réseau. La puissance apparente S étant un facteur de dimensionnement de l'installation. Les harmoniques de courant dégradent le facteur de puissance, car ils augmentent la valeur efficace des

courants de ligne (cf. (2)) et par conséquent la puissance apparente S . On rappelle que $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$ avec Q puissance réactive et D puissance déformante.

Les petites charges non-linéaires (éclairage, ordinateurs portables, électronique grand public...) de puissance inférieure à 75 W (voir Tableau 1) échappent actuellement aux normes. L'utilisation à grande échelle de ce type de charges est responsable de la pollution harmonique du réseau

Charges	(a)	(b)	(c)	(d)
V	237 V	237 V	237 V	237 V
THD V(%)	2,4 %	2,4 %	2,4 %	2,4 %
I	0,36 A	0,13 A	0,12 A	1,54 A
THD I(%)	5 %	43 %	121 %	76 %
F_p	0,31	0,88	0,45	0,26
P	29 W	32 W	17 W	95 W

Tableau 1 : Indicateurs de qualité d'énergie des quatre récepteurs dont la tension et l'intensité sont représentés sur la figure 1.

II.3. Les conséquences sur la conception de l'installation électrique

Les harmoniques ont de nombreux effets néfastes sur une installation électrique [3,4,5,7]. Nous mettons en évidence certains de leurs effets durant les essais de systèmes en 1^{ère} année et les TP de physique appliquée en 2^{ème} année.

II.3.a. Dégradation du facteur de puissance

La puissance déformante consommée par les charges non-linéaires (tout comme la puissance réactive) dégrade le facteur de puissance F_p , cette dépendance peut s'écrire de la manière suivante en fonction de $THD I\%$:

$$F_p = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD I\%}{100}\right)^2}} \quad (6)$$

Une telle dégradation conduit à augmenter la section des conducteurs de phase et de neutre. Nous proposons aux étudiants de déterminer la section des conducteurs pour différents choix de technologies d'éclairage d'un atelier industriel (voir III.3.c.).

II.3.b. Augmentation du courant de neutre

Même si les phases sont équilibrées par des charges non-linéaires (couplage étoile de trois ampoules fluocompactes), on observe un important courant de neutre (Fig. 3(b)&4(b)) dont la valeur efficace est bien plus importante que celle du courant de phase (Fig. 3(a)&4(a)). Ce phénomène est dû à la sommation des harmoniques de rangs multiples de 3 ($H_3, H_9, H_{15} \dots$) dans le conducteur de neutre [6].

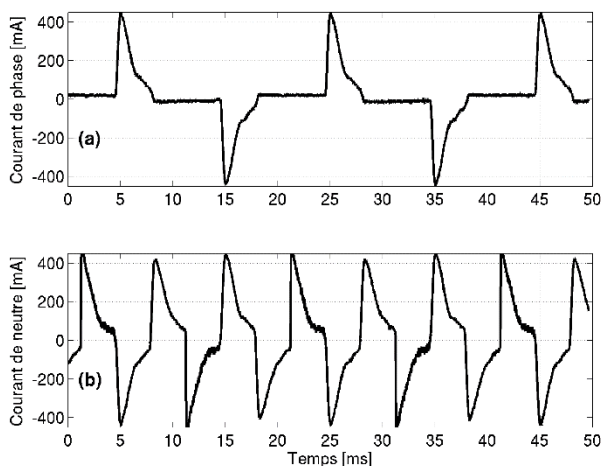


Figure 3 : (a) Courant de ligne absorbé par une ampoule fluocompacte ($I = 125 \text{ mA}$). (b) Courant de neutre mesuré pour trois ampoules fluocompactes couplées en étoile (valeur efficace 216 mA).

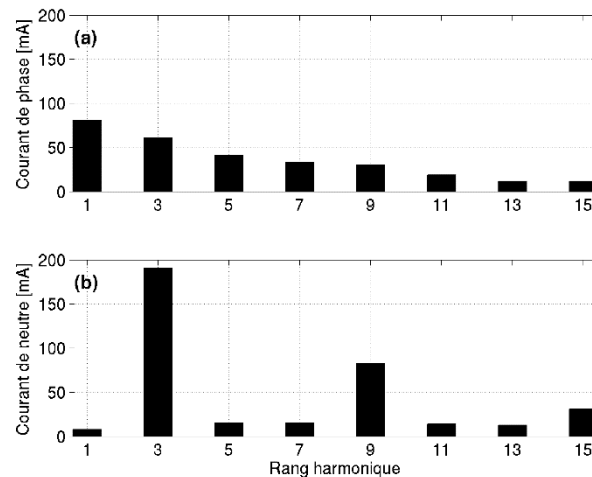


Figure 4 : (a) Spectre du courant absorbé par une ampoule fluocompacte. (b) Spectre du courant de neutre mesuré pour trois ampoules fluocompactes couplées en étoile.

II.3.c. Application au dimensionnement des sections des conducteurs

Lors de travaux dirigés, on étudie une usine composée de trois ateliers. On s'intéresse à l'un des ateliers où des postes à souder et de l'éclairage sont installés. L'avant-projet d'éclairage (non traité ici) a montré qu'un flux lumineux total de 690 000 lm était nécessaire.

Le câble d'alimentation triphasé du circuit d'éclairage de l'atelier est à dimensionner pour chacune des technologies d'éclairage (ampoule incandescente 100W, tube fluorescent TLD 18W/33 non compensé, tube fluorescent TLD 18W/33 compensé, ampoule fluocompacte 20 W).

Les points lumineux sont supposés être répartis de manière équilibrée sur chacune des phases d'un câble d'alimentation triphasé. Les caractéristiques du câble multipolaire sont les suivantes :

- type U 1000 R02V (PRC), âmes en cuivre,
- pose sur chemin de câble,
- 4 câbles sur le même chemin de câble,
- température ambiante maximale : 35 °C.

Les points principaux de la démarche adoptée pour choisir la section des conducteurs du câble sont récapitulés dans le Tableau 2. Les recommandations relatives au dimensionnement du conducteur de neutre sont à prendre en compte dans l'article 524.2 de la norme NFC-15100 (décembre 2002).

Technologies d'éclairage	Ampoule à incandescence	Tube fluorescent non compensé	Tube fluorescent compensé	Ampoule fluocompacte
Puissance consommée	100 W	18 W	18 W	20 W
Flux lumineux par point lumineux	1360 lm	1150 lm	1150 lm	1200 lm
Nombre de points lumineux à installer	170	200	200	192
Courant efficace dans le conducteur de phase	170 x 0,43 A → 73 A	200 x 0,36 A → 72 A	200 x 0,13 A → 26 A	192 x 0,12 A → 22 A
THD multiples de 3 (THD $I_{3n\%}$)	< 33%	< 33%	> 33%	> 33%
Courant dans le neutre (cf. norme NFC-15100)	-	-	1,45 x 26 A → 37,7 A	1,45 x 22 A → 31,9 A
Courant équivalent par phase ($I'z$)	$I'z = 73A/0,72$ → 101 A	$I'z = 72A/0,72$ → 100 A	$I'z = 26A/0,72$ → 36 A	$I'z = 22A/0,72$ → 31 A
Section des conducteurs du câble multipolaire	16 mm ²	16 mm ²	4 mm ²	2,5 mm ²

Tableau 2 : Dimensionnement de la section des conducteurs du câble multipolaire selon l'éclairage.

III. BILAN SUR LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE DE L'ATELIER

III.1. L'installation électrique et ses deux modes d'alimentation

Dans le cadre d'un projet industriel avec l'entreprise ATMEL, le lycée a été doté d'un GE et d'un compensateur actif. L'atelier d'essais de systèmes (Fig. 5) peut ainsi être alimenté, soit par le réseau électrique, soit par un GE de 30 kVA (Fig. 6). Un compensateur actif est inséré au point commun de couplage du tableau électrique (Fig. 5) pour pouvoir compenser toutes les charges polluantes de l'atelier (composées d'éclairage : 50 tubes fluorescents compensés 120 cm et de 15 ordinateurs alimentés par une alimentation sans interruption). La puissance totale consommée par l'atelier est en moyenne de 3,6 kW. Le compensateur actif doit être placé au plus près des émissions de pollution pour éviter qu'elle se propage aux nœuds amonts de l'installation. L'atelier ne possède pas de charges polluantes de forte puissance, et l'ajout de toutes charges linéaires (de forte puissance) a tendance à améliorer $THD I\%$ (cf. (4)), car cela augmente la valeur efficace du courant fondamental I_1 . Notre installation électrique nous permet seulement de faire travailler le compensateur actif à 10% de ses capacités ($I_H \sim 2 A$) pour un calibre de 20 A.

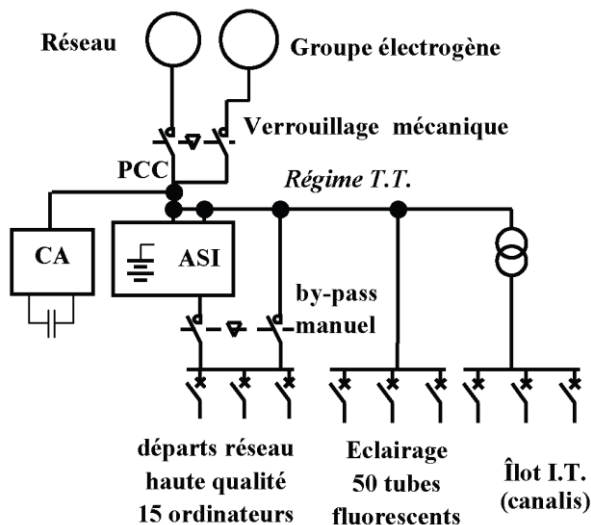


Figure 5: Schéma électrique de l'atelier d'électrotechnique. CA : Compensateur Actif, ASI : Alimentation Sans Interruption, PCC : Point Commun de Couplage.

III.2. Bilan des consommations d'énergie de l'installation

L'ensemble des résultats est regroupé dans le Tableau 3. Les étudiants mesurent en amont du point commun de couplage (Fig. 5) la qualité de l'énergie électrique distribuée, soit par le réseau, soit par le GE, au moyen d'un analyseur de réseau FLUKE™ 434/435 (bande passante des mesures de courants 10 kHz). Cet appareil (comme de nombreux autres) globalise la puissance réactive Q et la puissance déformante D , sous une même

« puissance réactive » exprimée en var . Il est important de montrer aux étudiants que ces deux puissances sont bien différentes l'une de l'autre. Durant trois séances d'essais de systèmes, les étudiants ont successivement pour tâches de :

1) quantifier la qualité de l'énergie électrique consommée par l'atelier et proposer des solutions en lien avec les indicateurs de pollution harmonique (diagnostic d'installation). Les résultats sont portés dans le Tableau 3 : *Alimentation réseau – compensateur actif « OFF »*.

Les étudiants constatent qu'une multitude de petites charges non-linéaires génèrent un $THD \%I > 25\%$, et que les harmoniques H_3 et H_9 se somment dans le conducteur de neutre. Le courant de neutre représente alors $\sim 50\%$ du courant de phase (incluant un léger déséquilibre des phases). Les étudiants sont alors invités à :

2) mettre en service le compensateur actif (Fig. 6) et évaluer la qualité de l'énergie électrique apportée par le réseau (voir IV. **Dépollution**). Les résultats sont portés dans le Tableau 3 : *Alimentation réseau – compensateur actif « ON »*.

Cet essai permet de montrer qu'il est possible de rendre quasi linéaire la charge apparente vue du réseau.

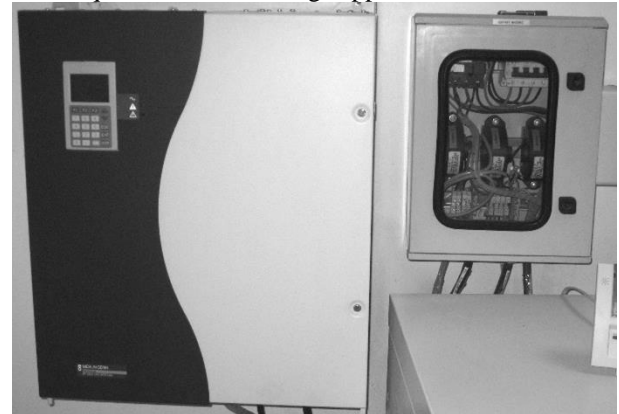


Figure 6: Compensateur actif SineWave (MGE UPS SYSTEMS™) de calibre 20 A (à gauche). Transformateurs d'intensité pour les mesures et les apports des courants de compensation (à droite).

3) mettre en service le GE (Fig. 7) et évaluer l'influence d'un $THD \%V$ dégradé sur la qualité de l'énergie électrique distribuée. Les résultats sont portés dans le Tableau 3 : *Alimentation groupe électrogène*.

Même si le GE est relativement peu chargé ($\sim 13\%$ de sa puissance nominale), le $THD \%V$ à vide du GE dégrade $THD I\%$. En effet, d'un $THD I\% \approx 30\%$ avec le réseau, on obtient $THD I\% \approx 45\%$ avec le GE. On constate alors que : lorsque $THD \%V$ est multiplié par un facteur $\sim 1,5$ (2,4% avec le réseau contre 4% avec le GE), $THD I\%$ est aussi multiplié par $\sim 1,5$ (voir les cases grisées dans le Tableau 4). Cela est lié au fait que $THD I\%$ est proportionnel à $THD \%V$.

Ce dernier essai permet de mettre en évidence l'influence des générateurs sur l'importance de la pollution harmonique des récepteurs.



Figure 7 : Groupe électrogène OLYMPIAN™ GEP30-1
Caractéristiques : 380-415 V, 50 Hz, 30 kVA, régulateur de tension R250 ($\pm 0,5\%$), excitation shunt auto-excité, THD V% à vide = 4%.

Tableau 3 : Qualité de l'énergie électrique selon la nature de la source d'énergie et de l'activation du compensateur actif.

F_c : facteur de crête en courant
 I : valeur efficace du courant de phase
 I_N : valeur efficace du courant de neutre

IV. DÉPOLLUTION PAR UN COMPENSATEUR ACTIF

L'insertion d'un compensateur actif type « shunt » se fait au point commun de couplage du tableau divisionnaire pour créer un nœud supplémentaire (Fig. 8). Le compensateur actif mesure en temps réel l'intensité des courants consommés par l'installation puis fournit, à travers le nœud créé (PCC sur Fig. 5), les courants harmoniques nécessaires aux charges non-linéaires (Fig. 8). Le réseau électrique n'a plus qu'à fournir le fondamental du courant (H_1). La charge apparente vue du réseau devient alors linéaire (Fig. 8).

Lorsque le compensateur est mis en service avec traitement global des puissances déformante et réactive, on observe que $THD I\% < 10\%$ au lieu de $\sim 30\%$, une amélioration du facteur de puissance (voir Tab. 3), une amélioration du facteur de crête en courant (voir Tab. 3), et une réduction de l'intensité du courant de neutre ($\sim 35\%$). On constate également une légère augmentation des courants de ligne liée à la consommation de puissance active nécessaire au compensateur actif.

Alimentation réseau - compensateur actif «OFF»

	PHASE 1	PHASE 2	PHASE 3
V	227 V	224 V	226 V
THD V(%)	2,4 %	2,5 %	2,3 %
I	6,3 A	4,8 A	5,4 A
THI I(%)	30,3 %	28,9 %	25,0 %
F_c	1,82	1,95	1,84
K	0,95	0,86	0,93
I_N	3,1 A		

Alimentation réseau - compensateur actif «ON»

V	227 V	224 V	226 V
THD V(%)	2,4 %	2,5 %	2,3 %
I	7 A	5,6 A	6,3 A
THI I(%)	8,2 %	9,6 %	8,0 %
F_c	1,63	1,84	1,67
F_p	1	0,91	0,99
I_N	2 A		

Alimentation GE - compensateur actif «OFF»

V	230 V	230 V	230 V
THD V(%)	4,0 %	4,3 %	4,1 %
I	6,5 A	5,1 A	5,6 A
THI I(%)	40,3 %	46,6 %	37 %
F_c	1,75	1,80	1,66
F_p	0,92	0,80	0,89
I_N	2,9 A		

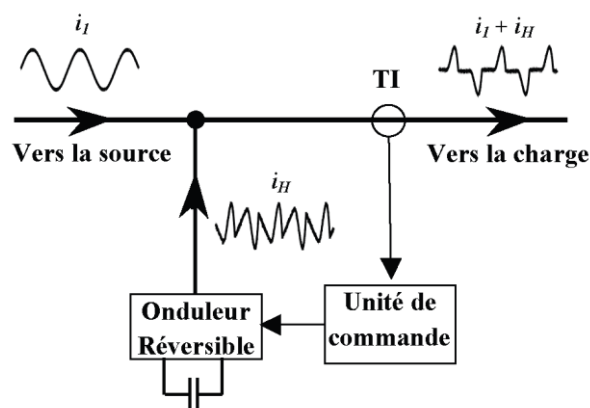


Figure 8 : Principe de fonctionnement d'un compensateur actif. TI : transformateur d'intensité

Un compensateur actif possède de nombreux avantages vis-à-vis d'un filtre passif anti-harmonique [2], et relativement peu d'inconvénients (coût et fiabilité), on peut citer comme avantages :

- 1) un traitement global et/ou sélectif des harmoniques du H_2 à H_{25} (bande passante 1,25 kHz).
- 2) aucun risque de résonance avec l'installation,
- 3) la possibilité de traiter la puissance réactive sous faible puissance déformante,

- 4) aucun risque de surcharge mais un fonctionnement en mode dégradé,
- 5) un excellent rendement énergétique sous forte charge déformante car le compensateur actif consomme au maximum 1 kW.
- 6) le système est communiquant et reconfigurable.

Un compensateur actif « shunt » à action parallèle se révèle être la solution de dépollution la plus intéressante en BT, sauf pour des raisons économiques. Il existe également diverses solutions de couplage au réseau, ainsi que des solutions hybrides largement détaillées dans [2]. La mise en œuvre de filtres anti-harmoniques est réalisée conjointement en TP de physique appliquée de 1^{er} année plutôt qu'en essais de système.

V. CONCLUSION

L'augmentation croissante du nombre de charges polluantes (ordinateurs, éclairage, variateurs de vitesse...) en milieu industriel engendre des courants harmoniques de plus en plus importants. C'est pourquoi, le compensateur actif est une solution flexible permettant d'obtenir un réseau de haute qualité ($THD V\% < 5\%$, cf. [3]). Son utilisation évite aux industriels de redimensionner les câbles électriques ou de mettre en œuvre des solutions passives (batteries de filtres anti-harmoniques, transformateurs couplés en zig-zag ou en triangle).

À travers les activités pédagogiques proposées dans cet article, les étudiants abordent les différents aspects de la pollution harmonique : les causes, les conséquences, et

les remèdes comme le ferait un technicien de terrain en charge de poser un diagnostic et de prescrire des solutions pour traiter la pollution harmonique [8].

Références bibliographiques

- [1] B. Douine, D. Netter et P. Loos, "Etude d'un variateur d'éclairage", La Revue 3EI, No 35, pp. 40-44, Dec. 2003.
- [2] E. Bettega et J-N. Florina, "Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs", Cahiers Techniques Schneider Electric, Cahier Technique n°183, 2000.
- [3] C. Colombert, J.M. Lupin, et J. Schonek, "Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement", Cahiers Techniques Schneider Electric, Cahier technique n°152, Sept. 1999.
- [4] M. Guillet, J-C Guignard et J-C Schubeneil, "Comprendre les harmoniques et leurs effets", La Revue 3EI, No 49, pp. 51-56., Juin 2007.
- [5] Schneider Electric, "Détection et filtrage des harmoniques", Guides Expert Basse Tension, No 4, Avril 2008.
- [6] J. Schonek, "Les singularités de l'harmonique 3", Cahier technique n°202, Cahiers Techniques Schneider Electric, Sept. 2000.
- [7] P. Ferracci, "La qualité de l'énergie électrique", Cahier Technique n°199, Cahiers Techniques Schneider Electric, Oct. 2001.
- [8] F. Eddi et J-F Ding, "Harmoniques et réseau", La Revue 3EI, No 34, pp. 43-54, Sept. 2003.

Contraintes engendrées sur les conducteurs par la pollution harmonique

Christophe GREZE, Laurent BOURGOIS

professeurs agrégés de génie électrique

Lycée Jules Ferry CANNES

Contact : christophe.greze@ac-nice.fr

Résumé : dans un souci d'économie d'énergie, la commission des communautés européennes a arrêté un règlement prévoyant la disparition progressive des lampes à incandescences, en plusieurs étapes, à compter de 2010, au profit des ampoules dites à économie d'énergie. (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0003:0016:FR:PDF>)

Ce changement n'est pas sans conséquence sur la qualité d'énergie et par voie de fait sur le dimensionnement des installations.

Nous nous sommes attachés dans ce T.P. proposé à des élèves de terminale STI électrotechnique à démontrer la présence de courants harmoniques, à les quantifier dans le but de dimensionner correctement le conducteur de neutre dans une installation triphasée.

I Introduction :

Suite à de nombreux incidents intervenus sur des installations triphasées d'éclairage concernant la surchauffe du conducteur de neutre, la norme **NF C 15-100** a été amenée à évoluer en 2002 quant au dimensionnement de ce dernier de la manière suivante :

§524.2.1 Le conducteur neutre éventuel doit avoir la même section que les conducteurs de phase :

- dans les circuits monophasés à deux conducteurs, quelle que soit la section des conducteurs
- dans les circuits polyphasés dont les conducteurs de phase ont une section au plus égale à 16 mm² en cuivre ou 25 mm² en aluminium
- dans les circuits triphasés susceptibles d'être parcourus par des courants harmoniques de rang 3 et multiple de 3 dont le taux d'harmoniques est compris entre 15 % et 33 %

§524.2.2 Lorsque le taux d'harmoniques de rang 3 et multiple de 3 est supérieur à 33 % en courant, le choix d'une section de neutre supérieure à celle du conducteur de phase peut être nécessaire.

Ces taux d'harmoniques se rencontrent par exemple dans les circuits dédiés à la bureautique et à l'informatique.

a) dans le cas d'utilisation de câbles multipolaires, la section des phases est égale à celle du conducteur neutre, le calcul de cette section étant fait pour le courant dans le neutre pris égal à 1,45 fois le courant d'emploi dans la phase.

b) dans le cas d'utilisation de câbles unipolaires, la section des phases peut être choisie inférieure à celle du neutre, le calcul étant fait :

- pour la phase : pour son courant d'emploi ;
- pour le neutre : pour le courant pris égal à 1,45 fois le courant d'emploi.

§524.2.3 Dans les circuits polyphasés dont les conducteurs de phase ont une section supérieure à 16 mm² en cuivre ou 25 mm² en aluminium, le conducteur de neutre peut avoir une section inférieure à celle des conducteurs de phase si les conditions suivantes sont simultanément remplies :

- la charge transportée par le circuit en service normal est supposée équilibrée et le taux d'harmoniques de rangs 3 et multiples de 3 ne dépasse pas 15 % dans le conducteur de phase ; en règle générale la section réduite du conducteur neutre n'est pas inférieure à la moitié de celle des conducteurs de phase.
- le conducteur neutre est protégé contre les surintensités suivant les règles ;
- la section du conducteur neutre est au moins égale à 16 mm² en cuivre.

Cette étude porte sur l'influence des sources d'éclairage d'une salle de spectacles sur la qualité de l'énergie électrique.

L'installation triphasée (230/400 V) est constituée de 216 lampes à incandescence 230 V, 40 W réparties de manière homogène sur chaque phase.

La rénovation consiste à remplacer ces lampes par des fluo compacts beaucoup plus économes (230 V, 14 W, et à redimensionner l'installation électrique. Pour obtenir un éclairage identique, le nombre de sources lumineuses sera porté à 282.

L'alimentation se fera par un câble multipolaire. La qualité de l'éclairage ne sera pas évaluée lors de cette étude, seul le dimensionnement de l'installation est envisagé.

II Alimentation par lampes à incandescence

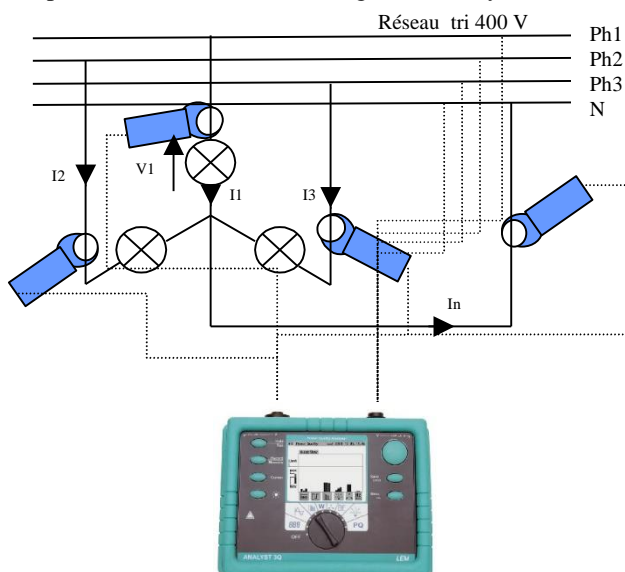
Dans cette partie, on étudiera le comportement de 3 lampes à incandescence (230 V, 40 W) montée sur un support et alimentées par un réseau triphasé + neutre 230 V/400 V.

II-1 Proposer le couplage à adopter pour connecter les lampes sur le réseau triphasé.

Sur ce montage, on placera les appareils de mesure permettant de relever :

- le courant en ligne et dans le neutre (spire 10 tours), la tension réseau, la puissance absorbée ainsi que le facteur de puissance (analyseur de réseau ou pince wattmétrique)
- la forme d'onde du courant du neutre et en ligne absorbé par les lampes (oscilloscope numérique + sonde de courant 100 mV/A ou analyseur de réseau)

On adoptera un couplage étoile avec neutre pour les lampes de 40 W fournies (montage avec analyseur).

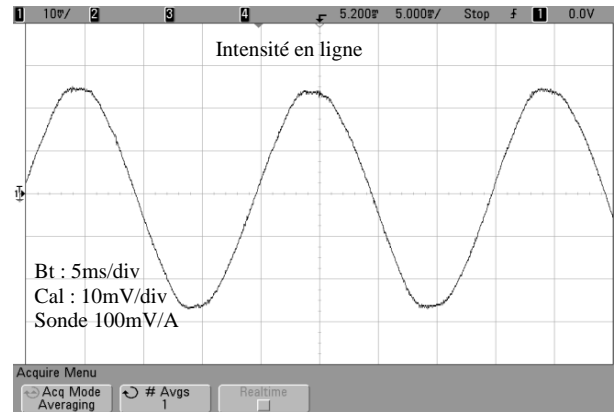


II-2 Mettre sous tension et relever la forme d'onde du courant circulant dans une phase ainsi que sa valeur efficace.

Préciser si l'allure du courant est sinusoïdale ou non et relever le facteur de crête noté Fc.

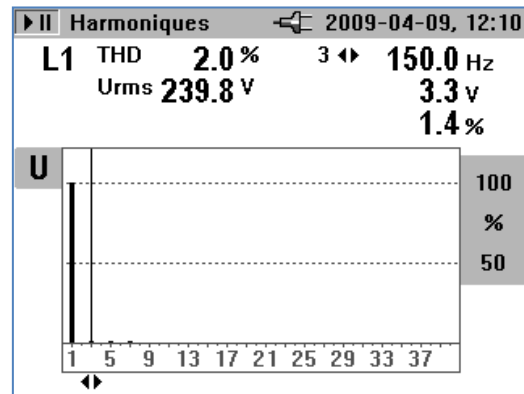
La valeur efficace du courant est de 0,16 A.

On constate que la forme d'onde du courant est sinusoïdale. Le facteur de crête est $\sqrt{2}$.



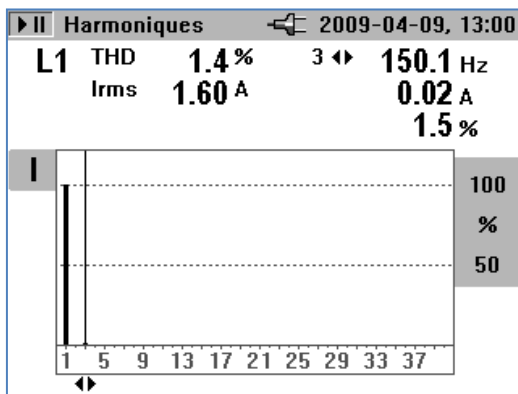
II-3 Réaliser une analyse harmonique du courant absorbé par une phase ainsi que de la tension simple du réseau (FFT oscilloscope ou analyseur de réseau). Préciser pour chaque relevé le taux individuel pour le rang 3 (150 Hz).

L'analyse harmonique réalisée par l'analyseur donne le relevé suivant pour la tension simple sur la phase 1 :



Le taux individuel d'harmonique en tension pour le rang 3 est de 1,4 %.

Le spectre du courant absorbé en ligne : (spire 10 tours)



Le taux individuel d'harmonique pour le courant est de 1,5 %.

II-4 Comparer le taux individuel d'harmonique en courant pour le rang 3 avec celui de la tension simple. Préciser si la charge est génératrice de courants harmoniques.

$T_{I3} = 1,5 \%$ et $T_{U3} = 1,4 \%$
 On peut donc considérer que la charge ne génère pas de courants harmoniques. Seuls les harmoniques présents sur la tension réseau se retrouvent dans le courant absorbé en ligne.
 Nous sommes donc bien présence d'une charge linéaire.

II-5 En déduire à partir de la norme NF C 15-100 la démarche à suivre pour dimensionner les conducteurs de phases et de neutre.

Dans le cas où $T_{I3} < 15 \%$ le dimensionnement est réalisé à partir du courant absorbé par une phase. La section du neutre est égale à celle de la phase pour les sections inférieures à 16 mm² et peut être minorée au-delà.

II-6 Mesurer la valeur du courant circulant dans le conducteur de neutre.

Les courants appelés par phases étant sinusoïdaux et de même amplitude on constate que le courant circulant dans le neutre est quasiment nul. Seules quelques traces du rang 3 subsistent.

De ce fait, le dimensionnement du conducteur neutre pouvait se faire de manière minorée par rapport à celui des conducteurs de phases.

II-7 Mesurer la puissance absorbée par l'installation ainsi que le facteur de puissance.

	kW	kVA	PF
L1	0.38	0.38	1.000
L2	0.40	0.40	1.000
L3	0.42	0.42	1.000

Le facteur de puissance est unitaire, la puissance absorbée est de 120 W (en tenant compte du rapport 10 pour le nombre de spires).

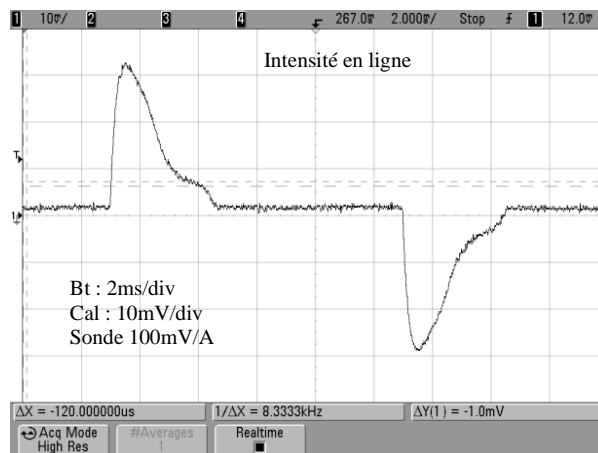
III Alimentation de lampes fluo compactes :

Dans cette partie, on étudiera le comportement de 3 lampes fluo compactes (230 V, 14 W) montées sur un support et alimentées par un réseau triphasé 400 V.

III-1 Remplacer sur votre montage les lampes à incandescence par des lampes fluo compactes et procéder au relevé de la forme d'onde du courant absorbé par phase.

Préciser si l'allure du courant est sinusoïdale ou non et relever le facteur de crête.

Cette fois-ci, l'allure du courant absorbé par une phase à une forme qui s'éloigne de la sinusoïde : $F_c = 3,22$

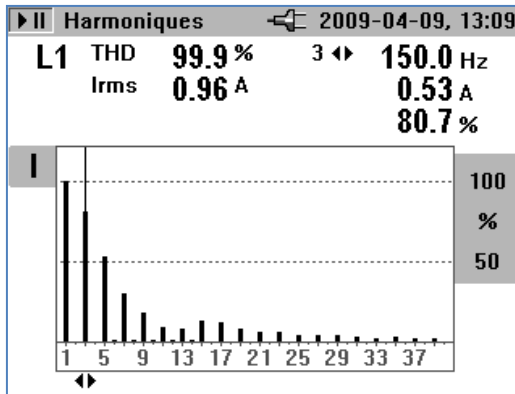


On remarque une diminution de la valeur efficace du courant qui prend la valeur de 96 mA.

III-2 Réaliser une analyse harmonique du courant. Comparer vos résultats avec le spectre de tension et préciser si la charge est génératrice de courants harmoniques.

L'analyse harmonique réalisée sur le conducteur de phase révèle un spectre de courant beaucoup plus riche que précédemment (spire 10 tours).

Le récepteur est cette fois-ci un générateur de courants harmoniques. Nous sommes en présence cette fois-ci d'une charge non linéaire.



III-3 À partir du relevé précédent, calculer la valeur efficace du fondamental ainsi que l'harmonique de rang 3.

Le fondamental a une amplitude de 66 mA alors que l'harmonique de rang 3 a cette fois-ci une valeur de 53 mA.

III-4 Préciser le taux individuel d'harmonique en courant pour le rang 3.

$$T_{I3} = 80,7 \%$$

III-5 À partir de l'extrait de la norme NF C 15-100 donnée en annexe, déterminer la procédure de choix de la section des conducteurs.

D'après le paragraphe §524.2.2 il faut dimensionner les conducteurs de phases et neutre en fonction du courant absorbé multiplié par 1,45 du fait de la mauvaise qualité du courant. ($T_{I3} > 33\%$)

III-6 Mesurer la puissance absorbée par l'installation ainsi que le facteur de puissance.

Puissance			
2009-04-09, 12:53			
L	kW	kVA	PF
L1	0.13	0.21	0.616
L2	0.14	0.23	0.618
L3	0.14	0.23	0.612

La puissance absorbée est de 41 W soit 3 fois moins que précédemment en revanche le facteur de puissance passe à 0,61.

III-7 Calculer pour la salle de spectacle la valeur du courant à prendre en compte pour le dimensionnement de la section des conducteurs sachant que le facteur de puissance est de 0,61.

$$S = P / Fp = (282 \times 14) / 0,61 = 6472 \text{ VA}$$

$$I = S / (U \times \sqrt{3}) = 9,34 \text{ A}$$

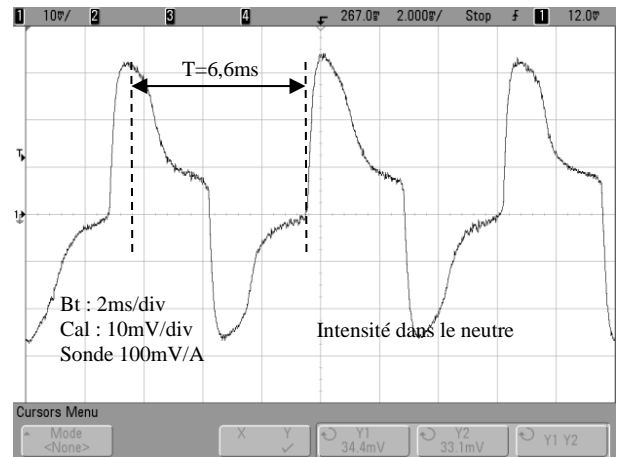
Dans le cas d'utilisation de câble multipolaires, la section des phases est égale à celle du conducteur neutre. Le calcul de cette section doit prendre en compte le courant dans le neutre égal à 1,45 fois le courant d'emploi dans la phase.

$$I = 1,45 \times 9,34 = 13,6 \text{ A}$$

Conséquences de la présence d'harmoniques de courant de rang 3 dans une installation triphasée sur le conducteur de neutre.

III-8 Visualiser et mesurer la valeur du courant circulant dans le conducteur de neutre. En déduire la fréquence de ce signal.

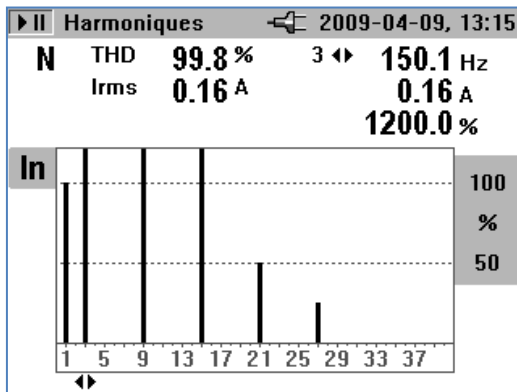
Bien que les trois phases soient équilibrées, cette fois-ci le courant circulant dans le neutre n'est plus nul :



On constate que la fréquence de ce signal est de 150 Hz donc essentiellement composée de rang 3. De plus, la valeur efficace du courant dans le neutre s'élève à 160 mA.

Il se trouve que cette intensité est bien supérieure à celle qui circule dans une phase - à laquelle on fait généralement référence pour dimensionner la section des conducteurs -.

III-9 Réaliser une analyse harmonique du signal courant dans le neutre. Préciser quels sont les harmoniques prédominants et quantifier le rang 3 (150 Hz) (1 spire).



On constate que les rangs 3 et multiples de 3 se retrouvent majoritairement dans le neutre. L'amplitude du rang 3 s'élève à 160 mA soit quasiment la valeur efficace du courant qui circule dans le conducteur de neutre.

III-10 Quelle relation simplifiée peut on trouver entre l'amplitude de I_{h3} et I_n ?

$$I_n = 160 \text{ mA}$$

$$I_{h3} = 53 \text{ mA}$$

Soit quasiment 3 fois plus que le rang 3 circulant dans une phase. En considérant que le rang 3 est prépondérant par rapport aux autres harmoniques, on peut donc en conclure que $I_n = 3 \times I_{h3}$. I_{h3} étant l'harmonique de rang 3 dans la phase.

III-11 Comparer la valeur du courant dans le neutre par rapport à celui absorbé par phase.

Le courant absorbé dans une phase est de 96 mA, celui du neutre de 160 mA soit 1,67 fois plus.

On donne ci-dessous les valeurs de section des conducteurs pour cette salle de spectacle pour les deux hypothèses suivante :

Hypothèse 1 : on calcule le courant absorbé par phase $I = 9,4 \text{ A}$ sans tenir compte de la présence d'harmoniques : $S_{ph} = S_n = 4 \text{ mm}^2$.

Hypothèse 2 : on tient compte de la présence de courant harmonique et on majore le courant d'un facteur 1,45 comme précisé par la norme : $S_{ph} = S_n = 6 \text{ mm}^2$

III-12 Quels sont les risques encourus si on néglige les courants harmoniques dans une installation d'éclairage ?

La conséquence majeure de ces courants harmoniques est la surchauffe du conducteur de neutre dont la section était auparavant minorée par rapport aux sections des phases, avec un risque d'incendie de l'installation.

Autre conséquence, le risque de déclenchement intempestif des protections lié à un facteur de crête trop élevé.

Conclusion :

La multiplication des sources lumineuses dites polluantes est la cause non négligeable de départ d'incendie sur les installations électriques à cause de la surchauffe du conducteur de neutre. Le simple fait de remplacer une ampoule à incandescence par une fluo compacte n'est pas anodin car elle entraîne la surcharge du conducteur de neutre en courant harmonique de rang 3 (dans un environnement triphasé plus neutre).

Il y a donc nécessité de redimensionner l'installation (canalisations et protections) dès lors que l'on souhaite migrer vers une source d'éclairage qui absorbe des courants non linéaires.

De plus, si le gain en puissance absorbée est bien réel (P est divisée par 2,2), la puissance apparente véhiculée sur le réseau est elle beaucoup moins bénéficiaire (S est divisée par 1,33).

La qualité d'énergie en pâtit aussi parce que le Taux de Distorsion Harmonique en courant augmente avec toutes les contraintes que cela impose pour le reste de l'installation concernant la distorsion de tension (THDu) selon la valeur de l'impédance de ligne.

Éclairage et économie d'énergie : Étude de deux gradateurs

Jean AGNEL, Christophe CARRERE, Frédéric SARNETTE

Lycée de Lorgues, 1 rue Emile Héraud – 83510 Lorgues

Résumé : *L'éclairage constitue un poste de dépense énergétique important aussi bien pour les particuliers que pour les collectivités (38% de la facture EDF pour les communes). La tendance actuelle, en matière d'économie d'énergie consiste à moduler le niveau d'éclairage (par variation de tension) en fonction des heures et des activités humaines.*

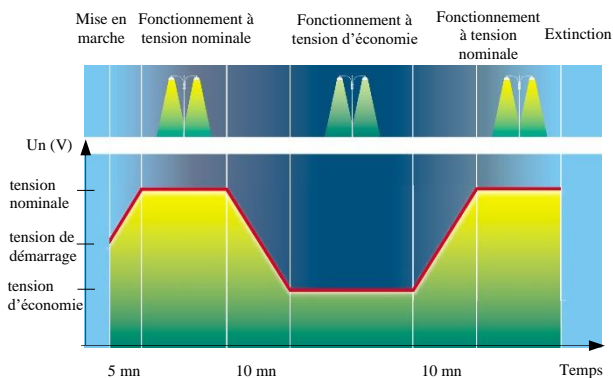
Dans cet article nous souhaitons mettre en évidence l'impact de la technologie utilisée sur la qualité de l'énergie électrique consommée.

Dans la première partie nous évaluerons les performances d'un gradateur traditionnel par des mesures directes et par simulation sur logiciel ; dans la deuxième nous simulerons le comportement des nouveaux gradateurs à découpage type LUBIO® de Schneider.

Introduction :

En réduisant de 20% la tension d'alimentation des réseaux d'éclairage public en milieu de nuit, on peut espérer une réduction de la facture énergétique d'une installation de l'ordre de 30%. En régulant précisément les variations de tension, on garantit un niveau d'éclairage constant et surtout on élimine les surintensités liées à l'élévation nocturne de la tension du réseau de distribution ce qui prolonge la durée de vie des lampes.

L'utilisation des variateurs permet également une mise sous tension progressive des luminaires ce qui a un effet positif sur la durée de vie des lampes. Au total cette durée de vie devrait augmenter de 25%.



À titre d'exemple, le variateur régulateur LUBIO développé par Schneider Electric exécute le cycle suivant :

- Démarrage progressif de l'éclairage jusqu'à la tension nominale,
- Régulation à la tension nominale (réglable de 210 V à 230 V) jusqu'à une heure fixe,
- Passage à la tension d'économie de façon continue et linéaire sur une durée fixe,

- Régulation à la tension d'économie (réglable de 180 V à 210 V) pendant une durée paramétrable,
- Retour à la tension nominale de façon continue et linéaire,
- Régulation à la tension nominale jusqu'à l'extinction.

Les ordres de démarrage ou d'extinction peuvent être donnés par l'horloge astronomique intégrée ou par un dispositif extérieur (relais Pulsadis®, interrupteur crépusculaire, ...)

On peut donc s'attendre à une extension de la mise en œuvre de ces équipements. Cependant, pour être performants, ils ne doivent pas dégrader le facteur de puissance des installations et être « propres » en ce qui concerne la pollution harmonique (surtout si on les implante sur des réseaux existants, en retour de neutre EDF).

Au cours des deux études proposées dans la suite de l'article nous n'aborderons que la fonction variation de tension.

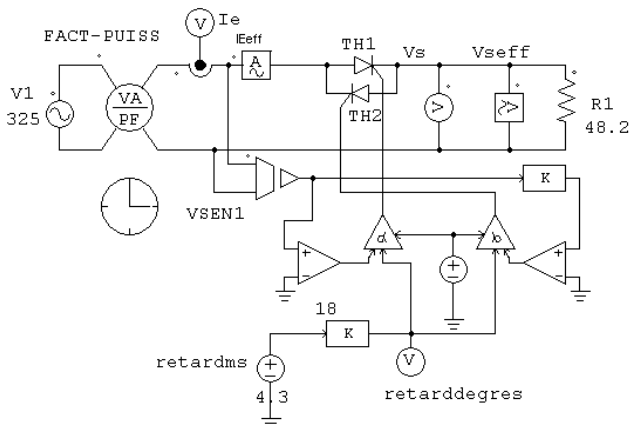
1. Gradateur à thyristors et qualité de l'énergie électrique

L'étude des performances d'un gradateur à thyristors dans le but d'effectuer des économies d'énergie peut s'effectuer en classe de terminale génie électrotechnique en parallèle :

- Première étude, théorique informatisée,
- Deuxième étude, expérimentale à l'aide d'un gradateur de type industriel.

1.1 Etude théorique informatisée du gradateur à thyristors

Pour l'étude informatisée, nous utiliserons le logiciel PSIM qui est téléchargeable gratuitement en version d'évaluation sur le site <http://www.powersys.fr/>. Cette version est largement suffisante pour toutes les études présentées dans cet article.



GRADATEUR A THYRISTORS

Figure 1 : Schéma permettant d'effectuer la simulation

Le générateur 'retardms' permet de régler le retard à l'amorçage des thyristors et le module 'VA/PF' donne la valeur du facteur de puissance de l'ensemble gradateur- charge.

1.1.1 Étude de la valeur efficace de la tension de sortie du gradateur

À partir du schéma représenté figure 1 on peut réaliser plusieurs simulations correspondant à des retards croissants en modifiant la valeur 'retardms'. On visualise alors sur deux écrans différents d'une part la tension de sortie instantanée $v_s(t)$ et sa valeur efficace V_{Seff} (cf. figure 2) et d'autre part le facteur de puissance de l'ensemble gradateur-charge (cf. figure 3).

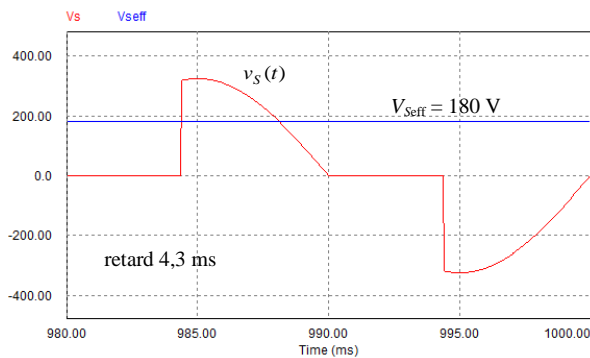
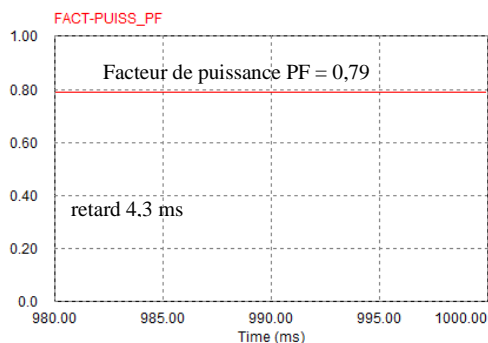
Figure 2 : Visualisation des tensions de sortie V_s et V_{Seff} en fonction du temps

Figure 3 : Visualisation du facteur de puissance en fonction du temps

Afin d'obtenir des valeurs précises de V_{Seff} et du facteur de puissance nous utilisons le menu 'Mesure' dans le module 'SIMVIEW' de PSIM.

Pour obtenir une valeur exploitable du facteur de puissance il faut imposer une échelle de 0 à 1 pour l'ordonnée au logiciel.

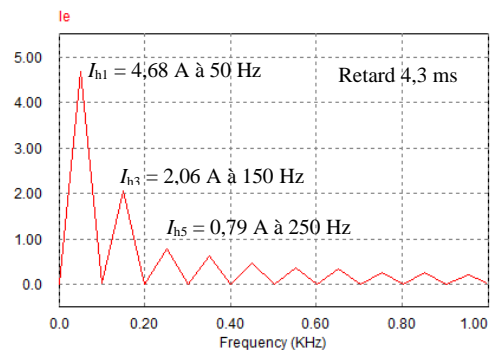
Les résultats de ces simulations sont consignés dans un tableau afin d'en faciliter la lecture et l'exploitation (cf. figure 5).

À la lecture des valeurs obtenues, on peut constater que le gradateur permet bien de régler la tension aux bornes de la charge, que la tension d'économie de 180 V est obtenue pour un retard compris entre 4 et 4,5 ms mais que le facteur de puissance passe alors en dessous de 0,83.

La question qui se pose ensuite est : *qu'en est-il de la pollution harmonique du système lorsque celui-ci fonctionne sous tension réduite ?*

1.1.2 Analyse harmonique du courant de ligne

L'analyse harmonique du courant I_e est obtenue en activant la fonction 'FFT' du module 'SIMVIEW'.

Figure 4 : Spectre harmonique du courant d'entrée I_e

Pour que ce spectre soit exploitable il faut calibrer l'abscisse de 0 à 1000 Hz.

On pourra répéter ces opérations pour différentes valeurs du retard en notant les valeurs des amplitudes d' I_{h1} et I_{h3} .

Le tableau (cf. figure 5) rassemble nos résultats pour différentes valeurs du retard. Le taux individuel de l'harmonique 3 est calculé de la manière suivante :

$$(I_{h3}/I_{h1})\% = (I_{h3}/I_{h1}) \times 100$$

retard ms	V_{Seff} V	PF	I_{h1} A	I_{h3} A	I_{h3}/I_{h1} %
0,50	228,80	0,99	6,74	0,06	0,92
1,50	226,20	0,99	6,60	0,47	7,17
2,00	222,70	0,97	6,43	0,78	12,13
2,50	217,30	0,95	6,18	1,12	18,12
3,00	210,40	0,92	5,88	1,43	24,32
3,50	200,80	0,88	5,47	1,73	31,63
4,00	188,90	0,83	5,00	1,96	39,20
4,50	175,00	0,76	4,47	2,10	46,98
5,00	159,16	0,69	3,91	2,14	54,79
6,00	124,46	0,54	2,77	1,92	69,26
7,00	85,30	0,37	1,65	1,36	82,23
8,00	48,58	0,21	0,77	0,71	91,83

Figure 5 : Tableau récapitulatif de l'étude informatisée sur PSIM

On constate que la diminution de V_S s'accompagne d'une augmentation significative du rapport I_{h3}/I_{h1} , ce qui correspond à une forte pollution du réseau par l'harmonique 3.

En parallèle avec cette étude théorique conduite avec les outils de simulation et de traitement, il est possible et même conseillé d'effectuer une étude similaire purement expérimentale.

1.2 Étude expérimentale du gradateur à thyristors

Afin de mener à bien les essais nous avons utilisé les matériels suivants :

- un gradateur Eurotherm[®] 460,
- une charge résistive de 48,3 Ω , 1000 W,
- un multimètre MX26 large bande pour la mesure de V_{Seff} ,
- un Fluke[®] 43B « power quality analyseur » pour l'étude harmonique et le facteur de puissance.

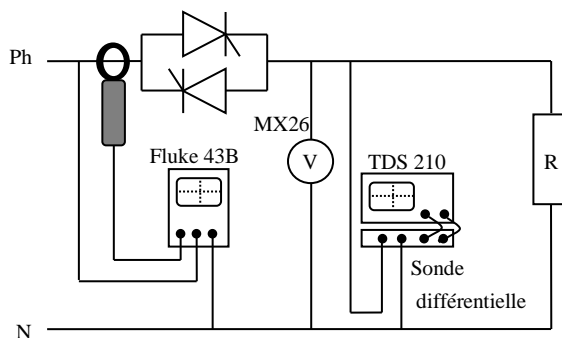


Figure 6 : Schéma de montage

Le réglage du retard est souvent très délicat surtout lorsque celui-ci est très faible, c'est pourquoi nous avons ajouté un oscilloscope permettant d'observer $v_S(t)$ pour régler ce retard.

L'analyseur Fluke 43B permet de mesurer le facteur de puissance, de visualiser le spectre du courant et d'obtenir directement le rapport I_{h3}/I_{h1} en utilisant les curseurs de mesure du logiciel 'Fluke View'.

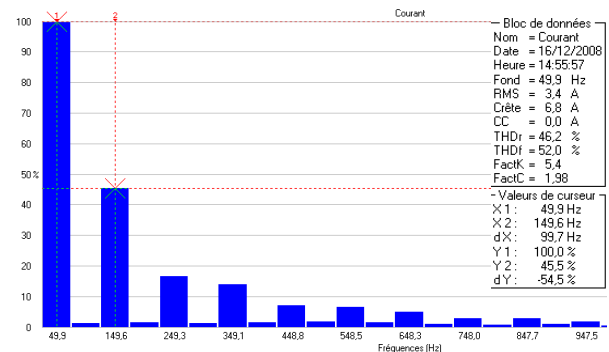


Figure 7 : Spectre harmonique du courant d'entrée I_e pour un retard de 4.5ms

En reprenant cette expérience pour plusieurs valeurs de retard, on relève V_{Seff} , PF et I_{h3}/I_{h1} et on obtient les valeurs suivantes :

Retard ms	V_{Seff} MX26	PF fluke	I_{h3}/I_{h1} %
0,50	226,00	1,00	1,30
1,50	225,00	0,99	6,80
2,00	222,00	0,98	10,80
2,50	217,00	0,96	17,10
3,00	211,00	0,94	22,70
3,50	202,00	0,90	30,00
4,00	189,00	0,85	39,00
4,50	178,00	0,80	44,60
5,00	163,00	0,73	53,70
6,00	125,00	0,57	69,10
7,00	86,00	0,36	82,70
8,00	54,00	0,27	91,10

Figure 8 : Tableau récapitulatif de l'étude expérimentale sur le gradateur Eurotherm[®] 460

Ces résultats confirment bien la dégradation du facteur de puissance et l'augmentation de la pollution harmonique quand la tension de sortie est réduite.

1.3 Comparaison des résultats obtenus et conclusion

Les figures 9 ,10 et 11 rassemblent les résultats obtenus par simulations et par mesures physiques.

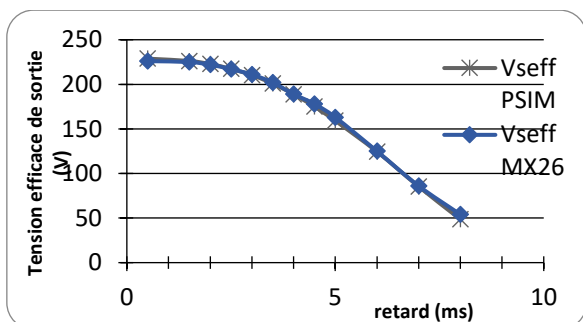


Figure 9 : Comparaison de la tension efficace de sortie en fonction du retard

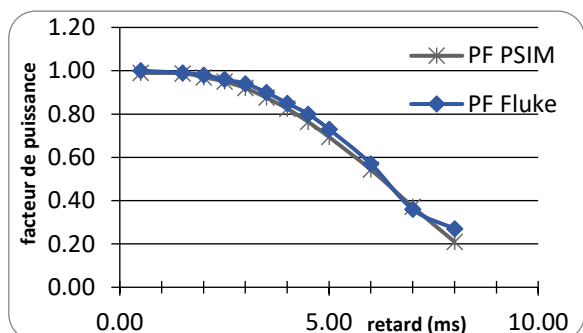


Figure 10 : Comparaison du facteur de puissance en fonction du retard

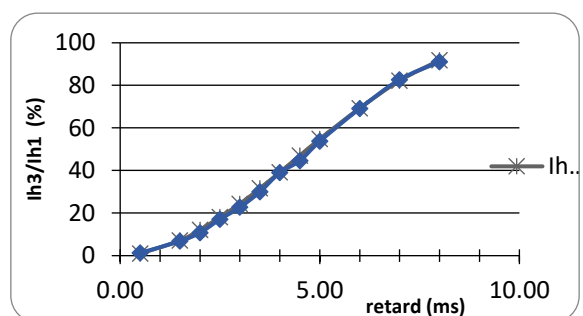


Figure 11 : Comparaison du rapport I_{h3}/I_{h1} en fonction du retard

Il apparaît donc après analyse de ces différents graphes que la simulation donne une image fidèle de la réalité expérimentale. Cela permet de convaincre les élèves de l'utilité des outils de simulation.

On peut poursuivre cette étude par un calcul des conséquences des harmoniques de rang 3 du courant sur le dimensionnement de l'installation. En effet, pour obtenir une tension d'économie d'énergie de 180 V, il faut imposer un retard de 4,3 ms au gradateur. Or dans ce cas, on a : $I_{h3}/I_{h1} = 2,06/4,68 = 0,436$ soit 44% et un facteur de puissance égal à 0,79.

Le taux élevé d'harmonique 3 peut conduire à des modifications de la section du neutre suivant la structure du réseau d'éclairage et il faut noter que la faible valeur du facteur de puissance conduit à des pertes joules supplémentaires dans les conducteurs d'alimentation.

Pour rester dans la norme au niveau harmonique et facteur de puissance, la tension V_s ne doit pas être inférieure à 200 V, ce qui ne permet alors qu'une faible

variation de tension pour réaliser des économies d'énergie.

2. Gradateur à découpage et qualité de d'énergie électrique

Le régulateur/réducteur de tension LUBIO® existe en deux puissances 3 et 6 kVA (In respectivement de 13,6 A et 27,3 A).

Il est utilisable en monophasé ou en triphasé par association de 3 modules et fonctionne avec presque toutes les sources.

Les paramètres modifiables sont :

- la tension nominale de fonctionnement, réglable de 210 V à 230 V, par pas de 1 V,
- la tension d'économie, réglable de 180 V à 210 V, par pas de 1 V.

Dimensions : H420 × L250 × P162 mm,

Masse approximative : 10,4 kg.

Le module se présente comme un système fermé et l'étude de son fonctionnement interne ne peut se faire que par simulation. Seule la fonction variation sera abordée dans ce qui suit.

2.1 Etude du principe de fonctionnement du variateur

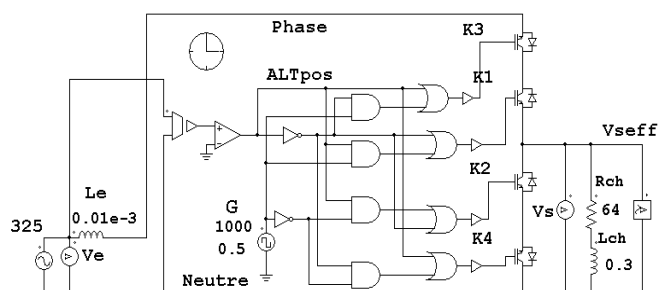


Figure 12 : Schéma de principe du variateur LUBIO®

Le circuit de puissance du modulateur est composé de quatre IGBT qui réalisent un découpage bipolaire de la tension du réseau.

La charge est simulée par Rch et Lch (correspondant à une lampe 250 W à iodures métalliques non compensée) afin de pouvoir éventuellement visualiser les courants dans les IGBT en conduction et en roue libre.

Lorsque la tension V_s est positive, on assiste à une succession de phases de conduction (le courant arrive de la phase, passe par la diode de K3, le transistor de K1 et retourne au neutre en traversant la charge), et de phases de roue libre au cours de laquelle le courant traverse le transistor de K4, la diode de K2 et se prolonge dans la charge.

Le transistor de K1 est commandé par le générateur de créneaux à rapport cyclique variable et celui de K4 par son complément.

Les transistors de K3 et K2 sont commandés en permanence.

Lorsque la tension V_s est négative, on assiste également à une succession de phases de conduction (I_e courant arrive par le neutre, traverse la charge, passe par la diode de K1, le transistor de K3 et retourne à la phase), et de phases de roue libre au cours de laquelle le courant traverse le transistor de K2, la diode de K4 et se prolonge dans la charge.

Le transistor de K3 est commandé par le générateur de tensions créneaux à rapport cyclique variable et celui de K2 par son complément.

Les transistors de K1 et K4 sont commandés en permanence.

Pendant les phases de conduction, la tension de sortie est égale à la tension du réseau et pendant les phases de roue libre, la tension de sortie est nulle.

Les équations logiques de commande des interrupteurs sont :

$$K1 = (ALT_{pos} \times G) + \overline{ALT_{pos}}$$

$$K2 = (\overline{ALT_{pos} \times G}) + \overline{ALT_{pos}}$$

$$K3 = ALT_{pos} + (\overline{ALT_{pos} \times G})$$

$$K4 = ALT_{pos} + (\overline{ALT_{pos} \times G})$$

Où ALT_{pos} est un signal à 1 à l'alternance positive et à 0 à l'alternance négative.

2.2 Simulation de la variation de la tension de sortie

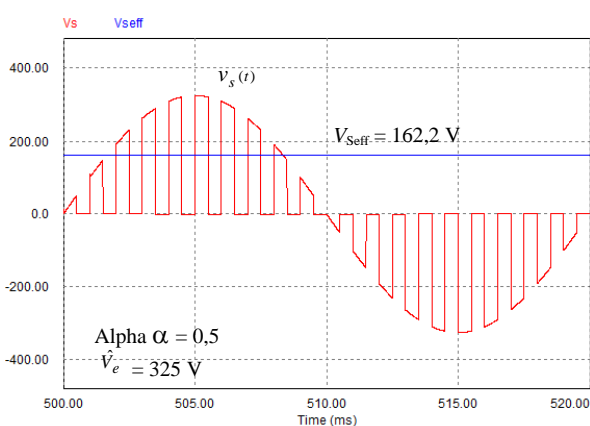


Figure 13 : Visualisation simultanée de la tension de sortie en instantané V_s et en efficace V_{seff}

Pour plus de lisibilité, cet essai est réalisé avec une fréquence de découpage de 1000 Hz qui est très inférieure à celle utilisée en réalité (≈ 15000 Hz).

En effectuant quelques simulations pour différentes valeurs du rapport cyclique α du générateur G, on peut montrer qu'il permet de régler la valeur efficace de la tension de sortie et tracer la caractéristique du modulateur.

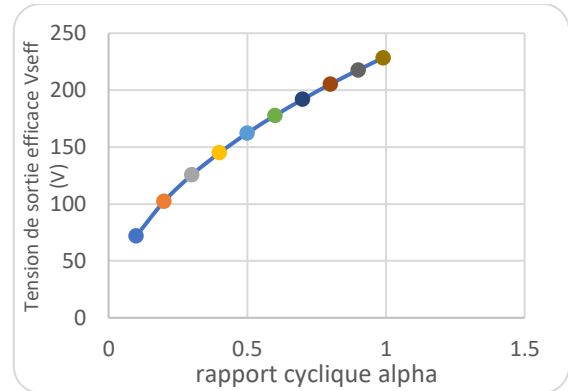


Figure 14 : Caractéristique du modulateur V_{seff} en fonction d' α

À ce stade, on peut prévoir que le rapport cyclique minimum en régime établi (tension d'économie de 180 V) est de l'ordre de 0,6.

2.3 Analyse harmonique de la tension de sortie

On réalise l'analyse harmonique de $v_s(t)$ en utilisant la fonction 'FFT' du module 'SIMVIEW' de PSIM.

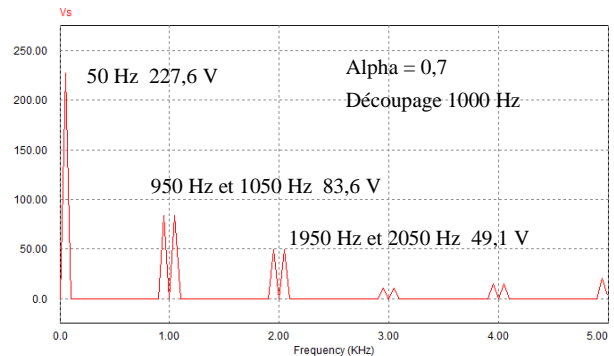


Figure 15 : Spectre harmonique de la tension de sortie V_s

Dans cet essai correspondant à un rapport cyclique $\alpha = 0,7$ on peut observer que :

- le fondamental à 50 Hz a une amplitude un peu différente de $325 \text{ V} \times 0,7 = 227,5 \text{ V}$
- les harmoniques sont regroupées par paires et situées à plus et à moins 50 Hz par rapport aux multiples de la fréquence de découpage

Note : certaines paires d'harmoniques disparaissent pour des valeurs particulières du rapport cyclique du générateur G (0,2 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,8 ; cf. figure 16).

Justification :

En observant l'allure de la tension $v_s(t)$ on peut facilement affirmer qu'elle est le produit de la tension secteur par les créneaux du générateur G (valeur maximum de 1).

Valeur de 1 de $t = 0$ à αT et de 0 de $t = \alpha T$ à T .

La tension de sortie du générateur G peut se décomposer sous la forme :

$$v_G = a_0 + \sum_1^{\infty} H_n \sin(2 \times \pi \times n \times fd \times t + \varphi_n)$$

Le terme a_0 est égal à α : valeur moyenne de la tension de sortie du générateur G.

H_n correspond à l'amplitude de l'harmonique de rang n et dépend du rapport cyclique conformément au tableau (cf. figure 16).

Ces valeurs peuvent être obtenues par le calcul intégral (qui n'est pas du niveau des classes de terminales) ou en important la tension de sortie du générateur G dans le logiciel 'HARMONIQUES' disponible sur le site <http://www.iufmrese.cict.fr/>.

alpha	H1	H2	H3	H4	H5	H6
0,100	0,197	0,187	0,172	0,151	0,127	0,101
0,200	0,374	0,303	0,202	0,094	0,000	0,062
0,300	0,515	0,303	0,066	0,094	0,127	0,062
0,400	0,605	0,187	0,125	0,151	0,000	0,101
0,500	0,637	0,000	0,212	0,000	0,127	0,000
0,600	0,605	0,187	0,125	0,151	0,000	0,101
0,700	0,515	0,303	0,066	0,094	0,127	0,062
0,800	0,374	0,303	0,202	0,094	0,000	0,062
0,900	0,197	0,187	0,172	0,151	0,127	0,101

Figure 16 : Tableau récapitulatif des amplitudes des harmoniques en fonction d'alpha

$$v_e(t) = \hat{V} \sin(2 \times \pi \times 50 \times t)$$

$$v_s(t) = \hat{V} \sin(2 \times \pi \times 50 \times t) \times v_G$$

En remplaçant V_G par sa décomposition en série de Fourier on trouve bien :

- un terme correspondant au fondamental en phase avec la tension d'entrée et dont l'amplitude peut être modulée en jouant sur le rapport cyclique du générateur G,

$$v_f(t) = \alpha \times \hat{V} \sin(2 \times \pi \times 50 \times t)$$

- des harmoniques placées à plus et à moins 50 Hz des multiples de la fréquence de découpage fd .

$$v_{hn}(t) = \frac{\hat{V} \times h_n}{2} (\cos(2 \times \pi (n \times fd + 50))t + \cos(2 \times \pi (n \times fd - 50))t)$$

On peut vérifier sur l'enregistrement précédent ($\alpha = 0,7$) :

$$V_{h1} = (325 \times 0,515) / 2 = 83,69 \text{ V pour une mesure de } 83,6 \text{ V}$$

$$V_{h2} = (325 \times 0,303) / 2 = 49,23 \text{ V pour une mesure de } 49,1 \text{ V}$$

Les premiers harmoniques peuvent atteindre des valeurs élevées (pour $\alpha = 0,5$) mais on pourra facilement les filtrer si l'on choisit une fréquence de découpage fd élevée.

2.4 Version définitive

On se rapproche du fonctionnement réel en adoptant une fréquence de découpage de 15 kHz et en plaçant des filtres LC à l'entrée et à la sortie (fréquence de résonance 1600 Hz) :

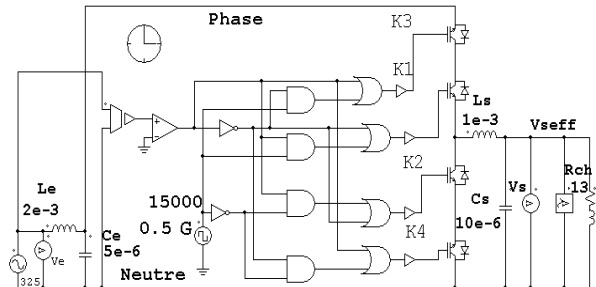


Figure 17 : Schéma de principe définitif

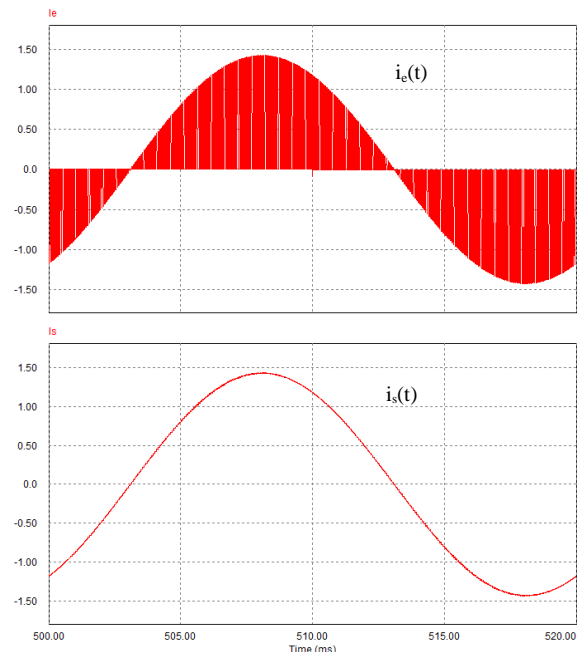
2.4.1 Simulation sans le filtrage de l'entrée et de la sortie

Figure 18 : Relevés du courant d'entrée et de sortie en fonction du temps (sans filtres)

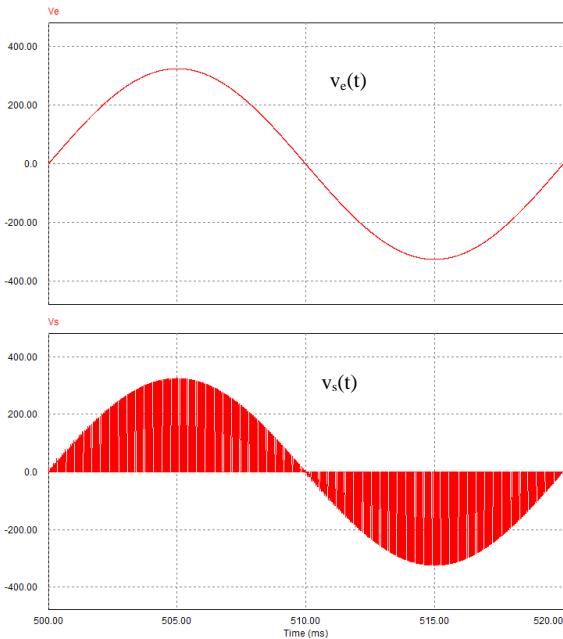


Figure 19 : Relevés de la tension d'entrée et de sortie en fonction du temps (sans filtres)

2.4.2 Simulation avec le filtrage de l'entrée et de la sortie

En visualisant $v_s(t)$, $v_e(t)$ puis $i_s(t)$ (courant dans la charge Rch) et I_e (courant dans Le), on peut constater que :

- le courant d'entrée I_e est sinusoïdal,
- le facteur de puissance n'est pas dégradé (bien que l'on constate une légère avance du courant I_e sur la tension V_e due au filtre d'entrée),
- le variateur se comporte comme un autotransformateur ($V_s / V_e = \alpha$ et $I_e / I_s = \alpha$),
- la valeur efficace de la tension d'économie 180 V, est atteinte pour $\alpha = 0,8$, valeur inférieure à celle prévue au §2.1.

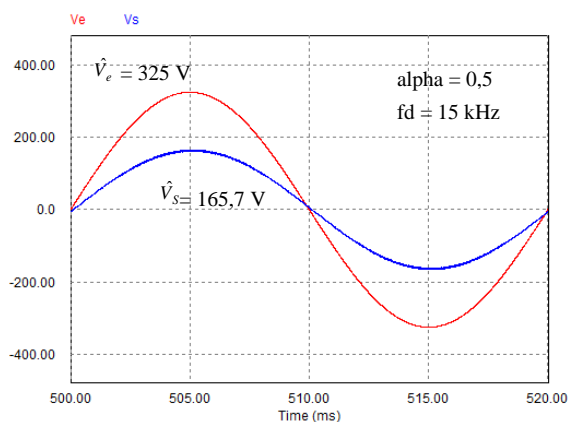


Figure 20 : Visualisation de la tension d'entrée et de sortie en fonction du temps (avec filtres)

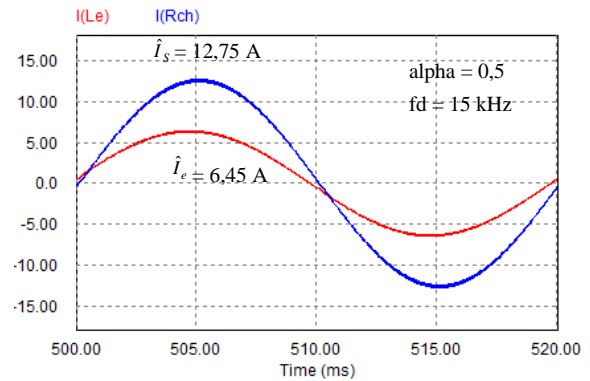


Figure 21 : visualisation du courant d'entrée et de sortie en fonction du temps (avec filtres)

Le pas de simulation (Time Step) est de $3,3 \mu\text{s}$ soit 20 fois plus faible que la période de découpage ($66,7 \mu\text{s}$). La simulation fonctionne encore correctement à 30 kHz.

2.5 Extension possible

Si l'on opte pour une fréquence de découpage de 100 Hz (dans le premier schéma), on obtient un modulateur « à avance d'extinction » ou « cut-off control » également utilisé dans les circuits d'éclairage (voir le cahier technique Schneider N°205).

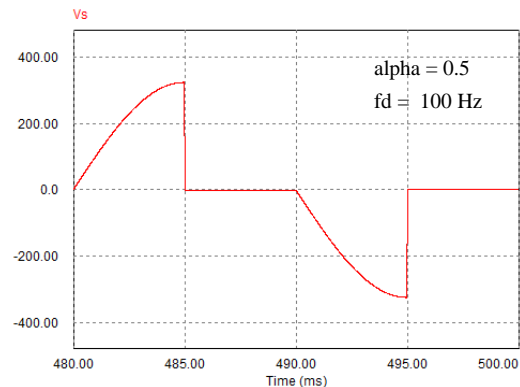


Figure 22 : visualisation de la tension de sortie en fonction du temps pour une fréquence de découpage de 100 Hz

Si on inverse la tension de sortie du générateur G on retrouve alors le fonctionnement d'un gradateur classique.

Il peut être intéressant de considérer les tensions des sorties de ces montages comme les produits de la tension réseau par celles du générateur G (100 Hz). On peut alors prévoir que leur fondamental est la somme de αV_e avec le repli de la fréquence $fd - 50$ qui est alors égale à 50 Hz et dont le déphasage dépend de α . La fréquence $fd + 50$ donne alors du 150 Hz et le 100 Hz disparaît etc...

3. Conclusion

La simulation donne de très bons résultats, elle semble être un bon outil pour prévoir les résultats des mesures. Il est cependant regrettable de ne pas pouvoir utiliser la fonction 'Subcircuit' dans la version de démonstration car elle permet de rassembler dans une 'boîte noire' soit l'ensemble du circuit, soit uniquement le circuit de commande, et de faire ainsi une approche systemique du fonctionnement des modulateurs.

PSIM permet aux élèves d'aborder l'analyse harmonique sans avoir à réaliser des calculs qui ne sont pas toujours de leur niveau.

Les contres performances électriques du gradateur traditionnel expliquent pourquoi, dans le domaine de l'éclairage, il est réservé à des faibles puissances (variateurs pour halogènes), ou à des applications pour lesquelles on ne recherche pas en priorité l'économie d'énergie (allumage progressif d'une salle de spectacle...)

Le variateur LUBIO® autorise un réglage continu, rapide et propre de la tension. Il devient un concurrent performant des systèmes utilisés jusqu'alors et qui utilisent des transformateurs à plusieurs enroulements commutés par des interrupteurs statiques.

À l'heure actuelle, pour tenir compte des nouvelles normes, nous devons, dans l'étude des modulateurs d'énergie, nous intéresser autant à la qualité de l'énergie absorbée qu'à la qualité de l'énergie produite.

retard ms	V _s mesurée	V _s simulée	V _s théorique
0,50	226,00	228,80	229,70
1,50	225,00	226,20	226,36
2,00	222,00	222,70	224,15
2,50	217,00	217,30	219,12
3,00	211,00	210,40	212,04
3,50	202,00	200,80	202,8
4,00	189,00	188,90	191,38
4,50	178,00	175,00	177,89
5,00	163,00	159,16	162,50
6,00	125,00	124,46	127,22
7,00	86,00	85,30	88,60
8,00	54,00	48,58	50,68

Figure A1 : tableau récapitulatif de la tension efficace de sortie Vs en fonction du retard

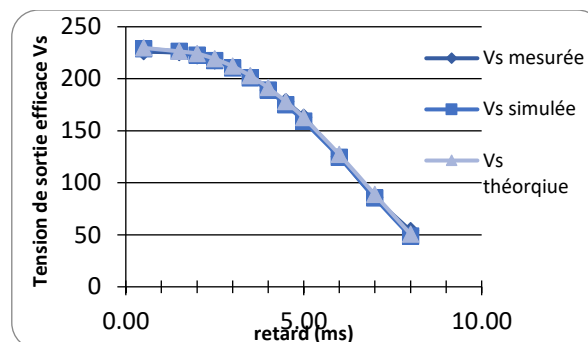


Figure A2 : comparaison des tensions efficaces de sortie en fonction du retard

On peut facilement constater que les résultats théoriques coïncident avec la mesure et la simulation faites sur le gradateur.

A.1.2 Analyse harmonique du courant de ligne

L'analyse harmonique du courant I_e est obtenue à l'aide de la décomposition en série de Fourier du signal $i_e(\alpha) = f(\alpha_0)$. (avec $\alpha = \omega t$)

$$A_n = \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\alpha) \times \cos(n\alpha) \times d\alpha$$

$$B_n = \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\alpha) \times \sin(n\alpha) \times d\alpha$$

$$i(\alpha) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \times \cos(n\alpha) + B_n \times \sin(n\alpha))$$

Avec $\alpha = \omega t$ et $\omega T = 2\pi$

L'amplitude de l'harmonique de rang n est

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \text{ et la valeur efficace } I_{Hn} = \frac{C_n}{\sqrt{2}}$$

ANNEXE

A.1 Etude théorique du gradateur à thyristors

Nous proposons dans cette partie une piste de réflexion sur les possibilités d'exploitation du gradateur pour des classes post-bac.

A.1.1 Étude de la valeur efficace de la tension de sortie du gradateur

Expression de la tension efficace V_{seff} en fonction de la valeur maximale V de la tension $v(t)$, et de l'angle d'allumage α_0 .

$$v_s^2(t) = \frac{1}{T} \int_0^T v_s^2(t) dt$$

$$\text{d'où } V_s = \hat{V} \sqrt{1 - \frac{\alpha_0}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha_0)}{2\pi}}$$

Avec α_0 correspondant au retard en radians

On trouve que pour $n=1$:

$$A_1 = \frac{\hat{V}}{R} \times \frac{\cos(2\alpha_0) - 1}{2\pi}$$

$$B_1 = \frac{\hat{V}}{R} \times \left(1 - \frac{\alpha_0}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha_0)}{2\pi}\right)$$

Et pour $n > 1$, A_n est nul pour les harmoniques de rang pairs et pour les rangs impairs :

$$A_n = \frac{\hat{V}}{\pi \times R} \times \left[\frac{\cos(n+1)\alpha_0 - 1}{n+1} - \frac{1 - \cos(n-1)\alpha_0}{n-1} \right]$$

$$B_n = \frac{\hat{V}}{\pi \times R} \times \left[\frac{\sin(n+1)\alpha_0 - 1}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha_0}{n-1} \right]$$

retard ms	mesurée			simulée			théorique		
	I_{h1}	I_{h3}	I_{h3}/I_{h1}	I_{h1}	I_{h3}	I_{h3}/I_{h1}	I_{h1}	I_{h3}	I_{h3}/I_{h1}
	A	A	%	A	A	%	A	A	%
0,50	6,29	0,08	1,30	6,74	0,06	0,92	6,73	0,05	0,78
1,50	6,20	0,42	6,80	6,60	0,47	7,17	6,54	0,44	6,69
2,00	6,08	0,66	10,80	6,43	0,78	12,13	6,30	0,72	11,48
2,50	5,86	1,00	17,10	6,18	1,12	18,12	5,93	1,02	17,24
3,00	5,61	1,27	22,70	5,88	1,43	24,32	5,45	1,30	23,77
3,50	5,25	1,58	30,00	5,47	1,73	31,63	4,87	1,50	30,87
4,00	4,78	1,87	39,00	5,00	1,96	39,20	4,22	1,61	38,34
4,50	4,39	1,96	44,60	4,47	2,10	46,98	3,52	1,62	46,01
5,00	3,81	2,04	53,70	3,91	2,14	54,79	2,83	1,52	53,7
6,00	2,65	1,83	69,10	2,77	1,92	69,26	1,57	1,07	68,47
7,00	1,57	1,3	82,70	1,65	1,36	82,23	0,66	0,54	81,4
8,00	0,81	0,74	91,10	0,77	0,71	91,83	0,18	0,16	91,45

Figure A3 : tableau récapitulatif de l'étude harmonique du courant i_e en fonction du retard

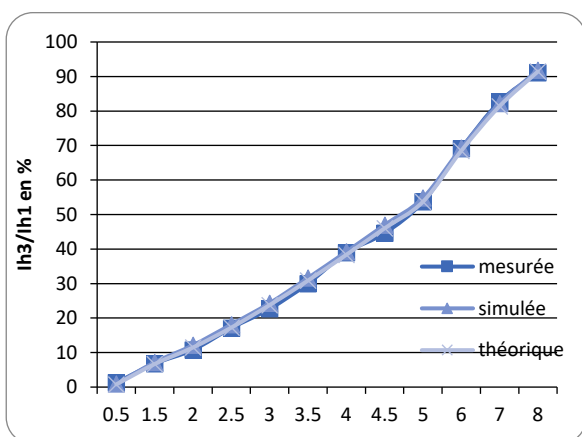


Figure A4 : comparaison des valeurs de I_{H3}/I_{H1} en fonction du retard

A.2 Etude théorique du variateur de type LUBIO®

A.2.1 Etude du spectre d'un générateur de créneaux

La tension de sortie du générateur G peut se décomposer sous la forme :

$$v_G = a_0 + \sum_1^{\infty} H_n \sin(2 \times \pi \times n \times fd \times t + \varphi_n)$$

Etude de a_0 :

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\alpha 2\pi} d\theta = a_0 = \alpha$$

Etude de A_n :

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\alpha 2\pi} \cos(n\theta) d\theta$$

$$A_n = \frac{1}{n\pi} \sin(n\alpha 2\pi)$$

Etude de B_n :

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\alpha 2\pi} \sin(n\theta) d\theta$$

$$B_n = \frac{1}{n\pi} (1 - \cos(n\alpha 2\pi))$$

$$H_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

alpha	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆
0,100	0,197	0,187	0,172	0,151	0,127	0,101
0,200	0,374	0,303	0,202	0,094	0,000	0,062
0,300	0,515	0,303	0,066	0,094	0,127	0,062
0,400	0,605	0,187	0,125	0,151	0,000	0,101
0,500	0,637	0,000	0,212	0,000	0,127	0,000
0,600	0,605	0,187	0,125	0,151	0,000	0,101
0,700	0,515	0,303	0,066	0,094	0,127	0,062
0,800	0,374	0,303	0,202	0,094	0,000	0,062
0,900	0,197	0,187	0,172	0,151	0,127	0,101

Figure A5 : valeur de H_n en fonction d'alpha pour n compris entre 1 et 6

A.2.2 Etude de la tension de sortie

Etude d'un cas particulier $\alpha=0,5$:

$$A_n = \frac{1}{n\pi} \sin(n\alpha 2\pi) = \frac{1}{n\pi} \sin(n\pi) = 0$$

$$B_n = \frac{1}{n\pi} (1 - \cos(n\alpha 2\pi))$$

Si n est pair : $\cos(n\pi) = 1$ alors $B_n = 0$

Si n est impair : $\cos(n\pi) = -1$ alors $B_n = \frac{2}{n\pi}$

Le spectre est simplifié et ne comporte que des termes en sinus et de rangs impairs.

$$v_G = 0,5 + \frac{2}{\pi} \sin(2\pi ft) + \frac{2}{3\pi} \sin(3 \times 2\pi ft) + \dots + \frac{2}{n\pi} \sin(n2\pi ft)$$

$$v_S = \hat{V} \sin(2\pi 50t) \times v_G$$

En développant on trouve pour V_s les termes suivants :

$0,5\hat{V} \sin(2\pi 50t)$ qui équivaut au fondamental à 50 Hz

$$\frac{2}{\pi} \sin(2\pi ft) \times \hat{V} \sin(2\pi 50t) = \frac{2\hat{V}}{\pi} \frac{\cos(2\pi(50-f)t) + \cos(2\pi(50+f)t)}{2}$$

$$\frac{2}{3\pi} \sin(6\pi ft) \times \hat{V} \sin(2\pi 50t) = \frac{2\hat{V}}{3\pi} \frac{\cos(2\pi(50-3f)t) + \cos(2\pi(50+3f)t)}{2}$$

$$\frac{2}{n\pi} \sin(n2\pi ft) \times \hat{V} \sin(2\pi 50t) = \frac{2\hat{V}}{n\pi} \frac{\cos(2\pi(50-nf)t) + \cos(2\pi(50+nf)t)}{2}$$

On trouve donc :

- un fondamental avec une amplitude de $0,5\hat{V}$
- et des harmoniques à $nf \pm 50\text{Hz}$ avec des amplitudes à $\frac{\hat{V}}{n\pi}$ avec n impair

A.2.3 Comparaison entre la théorie et la simulation

Rapport cyclique α	théorie					simulée				
	V_{h1} V	V_{h2} V	V_{h3} V	V_{h4} V	V_{h5} V	V_{h1} V	V_{h2} V	V_{h3} V	V_{h4} V	V_{h5} V
0,1	31,97	30,40	27,90	24,60	20,69	31,97	30,41	27,91	24,61	20,70
0,2	60,81	49,19	32,80	15,20	0,00	60,84	49,11	32,62	15,01	0,02
0,3	83,69	49,19	10,66	15,20	20,69	83,57	49,15	10,73	15,07	20,60
0,4	98,39	30,40	20,27	24,60	0,00	98,44	30,34	20,35	24,58	0,02
0,5	103,45	0,00	34,48	0,00	20,69	103,27	0,02	34,29	0,02	20,49
0,6	98,39	30,40	20,27	24,60	0,00	98,31	30,41	20,35	24,64	0,2
0,7	83,69	49,19	10,66	15,20	20,69	83,56	49,12	10,70	15,06	20,58
0,8	60,81	49,19	32,80	15,20	0,00	60,86	49,17	32,71	15,09	0,12
0,9	31,97	30,40	27,90	24,60	20,69	31,91	30,78	27,90	24,63	20,74

Figure A6 : valeur de V_{Hn} en volts en fonction de alpha

RÉNOVATION D'UNE STATION DE POMPAGE

Patrick LEFORT⁽¹⁾, Jean-Michel TRUC⁽²⁾, Jean-Luc RODRIGUEZ⁽²⁾

⁽¹⁾ IA-IPR Académie d'Aix-Marseille

⁽²⁾ STS Electrotechnique, Lycée Philippe de Girard – 84 AVIGNON

J. M. TRUC - jm.truc@laposte.net

Résumé : les lycées technologiques de l'académie d'Aix-Marseille qui possèdent la formation au baccalauréat génie électrotechnique sont dotés, pour leur plus grand nombre d'un système technique représentatif d'une station de pompage d'eau d'irrigation (16 systèmes). Ce système a été doté en 1992. Après des années de bons et loyaux services, on constate une obsolescence technique et pédagogique ainsi que des problèmes de sécurité électrique.

Trois solutions de modernisations se faisaient jour :

- Achat d'un nouveau système auprès du fournisseur d'origine, ceci pour un coût global de 560 000 €,
- Rétrofit délégué entièrement auprès du fournisseur d'origine pour un montant global de 476 000 €,
- Rétrofit après élaboration d'un prototype par une section de STS de l'Académie. C'est cette dernière solution retenue qui vous est présentée.

1. Programme d'action 2006-2007

Phase 1 : pour vérifier la validité du projet de rénovation et sa faisabilité, une équipe d'enseignants a été sollicitée dès juillet 2006. Sous forme d'un projet de BTS électrotechnique, un prototype de rénovation a été élaboré au lycée Philippe de Girard d'Avignon par huit étudiants durant l'année scolaire 2006-2007. Le financement de ce prototype, et donc des différentes solutions techniques envisageables, a été assuré grâce aux crédits d'État (10 000 € versé en février 2007 par le Rectorat).

Phase 2 : rédaction du cahier des charges et consultation des entreprises.

2. Prototype (juin 2007)

L'évolution du projet est présentée dans une logique permettant de visualiser les états « AVANT » et « APRÈS » en apportant à chaque étape une explication technique.

2.1. Partie opérative

2.1.1. Avant la rénovation (photo 1)

Les moteurs des deux pompes sont des moteurs asynchrones triphasés de 750 W - 1 500 tr/min alors que la vitesse nominale de la pompe (volute) est de 3 000 tr/min. Cela induit une mauvaise charge du moteur électrique qui fonctionne en sous régime (400 W consommés) et une faible mise en pression du circuit hydraulique (capteur de pression 0-1 bar). De plus ces pompes sont bruyantes et nécessitent du fait de leur âge une maintenance régulière des garnitures (fuites).



Photo 1

2.1.2. Après la rénovation (photo 2)

Les nouvelles pompes choisies (Grundfos CH4-40 tri) sont entraînées par des moteurs asynchrones triphasés qui sont adaptés. Elles sont donc plus silencieuses. Une pompe fonctionne à vitesse constante, l'autre fonctionne à vitesse variable. La mise en pression du circuit hydraulique est désormais satisfaisante (3,5 bars à 0 m³/h, 2 bars à 10 m³/h). De plus le clapet anti-retour a retrouvé sa place logique. Le capteur de pression a été changé (Grundfos 91072076) pour répondre aux nouvelles performances du circuit hydraulique.



Photo 2

2.2. Partie commande

2.2.1. Avant la rénovation (photo 3 & 4)

L'armoire occupe une grande emprise au sol. Il n'existe pas de pupitre de commande interactif, seules des commandes conventionnelles par boutons poussoirs. Des ampèremètres et fréquencemètres remplissent la fonction d'affichage.



Photo 3

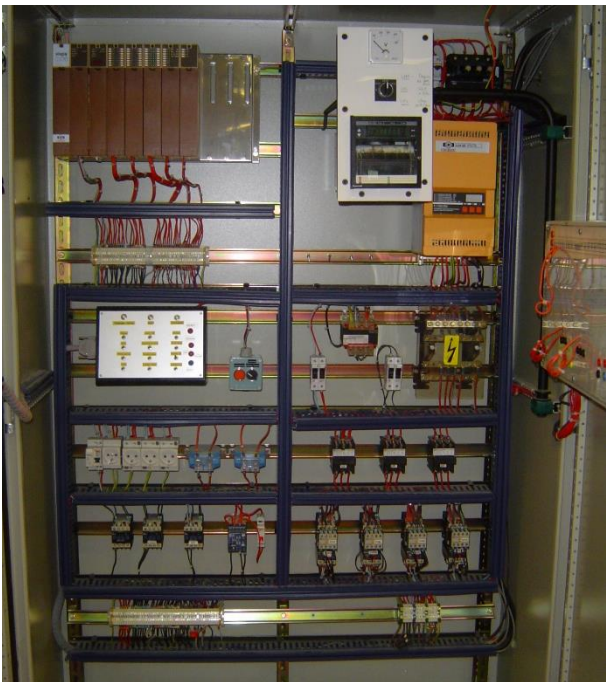


Photo 4

Sécurité :

Les manipulations des commandes du pupitre interne (boucles de régulation) ainsi que l'accès à l'enregistreur se font portes ouvertes alors que le bornier de répartition du 400 V n'est pas IP 2X.

CET ÉQUIPEMENT EST NON CONFORME ET DANGEREUX.

Technique :

L'automate programmable industriel chargé du pilotage du process (CEGELEC Alspa) n'est plus suivi depuis 1999. Il en est de même pour le variateur de vitesse du moteur asynchrone de l'électropompe. Les logiciels de programmation d'origine de ces deux produits ne sont plus implantables sur les PC récents. Ce système est obsolète.

Pédagogique :

Le système ne comporte aucun dispositif permettant une commande ou même une simple observation à distance des paramètres de fonctionnement car il est démuné de réseau de communication. L'interface homme/machine permettant un suivi de la production ou un paramétrage en local ou une aide au dépannage est absente.

CE SYSTÈME EST AMÉLIORABLE SUR LE PLAN PÉDAGOGIQUE.

2.2.2. Après la rénovation (photo 5 & 6)

Le volume de l'armoire est significativement réduit (il n'est pas encore optimisé sur la maquette à cause du réemploi d'une armoire disponible). Les connexions entre la partie opérative et l'armoire de commande se font par des connecteurs industriels conformes à l'environnement d'exploitation.



Photo 5

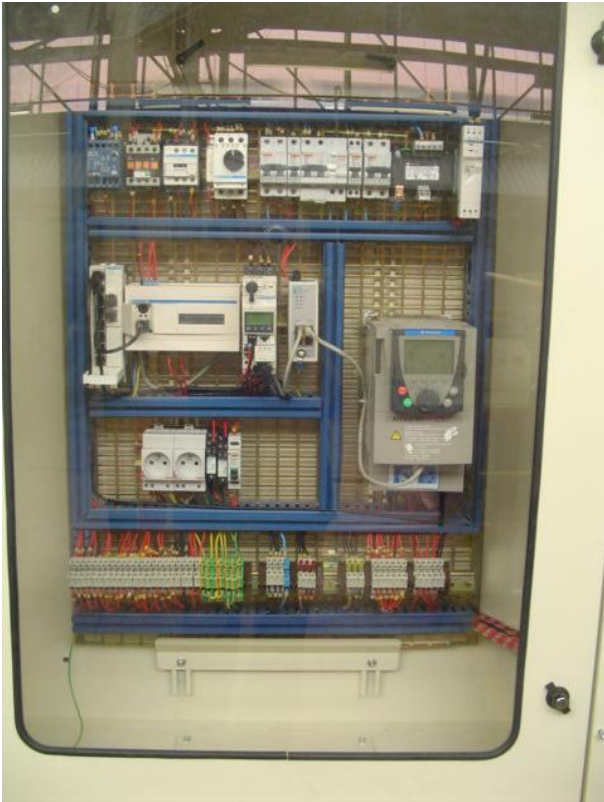


Photo 6

Sécurité :

Tous les matériels utilisés présentent l'indice de protection IP 2X. Le pupitre de commande du variateur peut être placé sur la face avant de l'armoire. L'élève n'a plus à intervenir sous tension dans l'enceinte de l'armoire.

Technique :

L'automate programmable industriel (Twido Schneider) chargé de la supervision du système est muni d'une interface Ethernet natif. Le variateur de vitesse (de dernière génération : ATV 61 Schneider sorti 1^{er} trimestre 2007) est un produit disposant d'une carte applicative « pompage » et d'une carte applicative « communication ». C'est ce variateur, lui aussi communicant, qui pilote la régulation de pression.

Pédagogique :

Le système comporte un réseau de communication de terrain Modbus (déterministe) et un deuxième réseau Ethernet qui permet un pilotage intégral et une supervision distante (Vijéo Look de Schneider). Le contacteur de la pompe à vitesse fixe est muni d'une fonction communication renvoyant les états et les alarmes (TeSys U Schneider).

2.3. Validation du prototype

La maquette répond aux exigences fixées par le cahier des charges de la rénovation et a prouvée la validité du concept de cette rénovation.

Elle a permis l'élaboration d'un cahier des charges de la rénovation des 16 stations de pompes. Celui-ci a été soumis pour chiffrage à plusieurs prestataires (dont le fournisseur originel du système).

Un calendrier précis de cette rénovation et des indisponibilités qu'elle générera est à prévoir car même en l'état, ce système académique est encore utilisé dans la formation et sert de support d'évaluation au baccalauréat génie électrotechnique.

3. Cahier des charges (novembre 2007)

Il s'agit d'organiser la rénovation de 16 stations de pompes disponibles dans 16 établissements de l'Académie d'Aix-Marseille au sein de la formation au baccalauréat génie électrotechnique.

Le prototype de la station rénovée est disponible sur le site du lycée Philippe de Girard d'Avignon. Il a permis de valider certains choix technique qui seront repris dans les prescriptions du présent cahier des charges.

3.1. Prise en charge

Chaque station de pompage sera à retirer au sein de l'établissement avec les moyens de manutention et les moyens humains de l'entreprise retenue pour l'opération. Cette prise en charge sera signifiée à l'établissement au moins 2 mois avant sa réalisation. Le débranchement de la station vis-à-vis des réseaux de distribution (eau et électricité) et sa vidange sont à la charge de l'établissement.

3.2. Partie opérative**Réservoir**

Le support sera à repeindre suivant la couleur d'origine (peinture thermo laquée 2 couches anti-rouille).

Un dispositif anti vortex sera placé au sein du réservoir (plaque de PVC épaisseur 10 mm placée verticalement sur toute la hauteur du réservoir).

Le retour d'eau des pompes sera prolongé par une canne verticale de même diamètre intérieur que la canalisation de retour (DN50) jusqu'à 10 cm du fond du réservoir.

Châssis avec pompes, capteurs et circuit hydraulique

Le support sera à repeindre suivant la couleur d'origine (peinture thermo laquée 2 couches antirouille).

Les pompes d'origine sont à changer pour deux pompes triphasées de marque Grundfos® modèle CH4-40. Le châssis sera à modifier pour accepter ces nouvelles pompes ainsi que le circuit hydraulique. Le circuit hydraulique conservera à l'issue de ces modifications ses caractéristiques originelles (sections, longueurs, matériaux).

Le capteur de débit sera conservé s'il est en état de fonctionnement et calibré. Sinon il sera à changer par un capteur de débit adapté (0 – 700 l/min, sortie 4-20 mA, canalisation DN50, sans affichage).

Le capteur de pression sera changé pour un capteur Grundfos® modèle : 910 72 076 (0 – 6 bar, 4-20 mA, prise G 1/2").

Les clapets anti retour seront déplacés et installés sur le circuit hydraulique de façon à pouvoir être isolés avec leurs pompes par les vannes d'isolement.

Le manostat sera conservé et déplacé pour être installé dans le volume enveloppe du châssis.

Liaison entre réservoir et châssis avec pompes

Les tuyaux annelés seront conservés. Les dispositifs de fixation de ces tuyaux (Serflex® inox) seront remplacés.

3.3. Partie opérative

Connectique

La liaison entre l'enveloppe de la partie commande et le châssis pompes se fera par :

- pour l'alimentation des pompes par câble H07 RNF de section adaptée arrivant sur des prises Hypra® 3P+N+T (Legrand 522 64) situées sur la façade droite de l'armoire.
- pour les conducteurs de liaison des capteurs par des conducteurs souples H07VK placés dans un conduit métal-plastique double agrafage (Legrand 635 65) arrivant sur un connecteur multi pôles Hypra® 16 P+T avec verrouillage et presse étoupe métal M25 (Legrand 531 32 + 636 38) situées sur la façade droite de l'armoire.
- la distance entre l'armoire de commande et le châssis pompe pourra être de 3 m.

- L'alimentation de l'armoire de commande se fera par un câble HO7RNF placé dans une canne verticale métallique de longueur 2 m pour une connexion sur système Canalis®. Le coffret de branchement sera à fournir. Le point de branchement pourra être à 9 m de la verticale de la canne. La canne sera fixée de façon rigide mais démontable sur l'armoire de commande.

Enveloppe

L'armoire d'origine ne sera pas réutilisée. Elle restera la propriété de l'entreprise retenue.

L'armoire métallique, de dimensions adaptées, devra posséder une façade vitrée permettant l'observation du câblage de la partie commande. Son indice de protection devra être conforme à l'environnement du système (laboratoire d'électrotechnique de lycée technologique) et aux contraintes propres au système.

La face avant supportera les organes de commandes et de signalisation ainsi que l'Interface Homme Machine déportée de l'ATV 61. Le dispositif de condamnation général sera placé sur la face droite de l'armoire.

L'accès au réseau sera assuré par une prise RJ45 placée en façade droite, d'indice IP 67 (Legrand 533 02).

Un dispositif devra permettre son utilisation en sécurité (sans basculement) lorsqu'elle sera placée sur un établi standard (pas de fixation à devoir prévoir).

Principe de la régulation

On régulera en pression sans tenir compte du débit. Une pompe fonctionnera en vitesse variable commandée par un ATV61 0,75 kW 480 V TR (Schneider ATV61H075N4) muni d'une carte application pompage (Schneider VW3A3503) tandis que l'autre pompe sera commandée en tout ou rien par la carte « application pompage » via un démarreur-contrôleur multifonctions communiquant (TeSys U Schneider avec option affichage et communication). La permutation automatique des pompes ne sera pas prévue.

Fonctionnalités

La protection sera assurée par des disjoncteurs magnétothermiques (pas de fusible).

La régulation sera assurée par la carte « application pompage » du variateur de vitesse de la pompe à vitesse variable. L'automate programmable industriel servira lui à la gestion des sécurités, à la communication et à la gestion de la supervision.

Cet automate sera un modèle Twido compact avec liaison Ethernet native, 40 ES TOR port Modbus Maître/esclave et port RS 485, alimentation 240 V (TWDLCAE40DRF options TWDNAC485D et 499 TWD 01100 Schneider) sans extension mémoire, sans afficheur.

La configuration, le réglage, le pilotage de la station de pompage devront pouvoir être assurés sur un PC distant équipé du logiciel Vijeo Look via le réseau Ethernet. Les informations d'état (état des contacteurs, des pompes, débit, pression, vitesse, ampérage, etc.), de sécurité (disjonction, surcharge, etc.) seront visualisées sur des synoptiques de supervision.

La station de pompage et le variateur ATV 61 devront pouvoir être accessibles à distance via des adresses IP fixes.

Le forçage de la pompe à vitesse fixe devra être possible quelque soit l'état de la pompe à vitesse variable, ceci par bouton poussoir à partir de la façade du coffret de commande.

Trois modes de fonctionnement seront possibles : AUTO - OFF - MANU par commutateur rotatif en façade et par le logiciel Vijeo Look sur PC distant.

Le terminal graphique déportable (VW3 A1 101 Schneider) de l'Altivar 61 sera déporté sur la façade du coffret de commande (kit VW3 A1 102 + VW3 A1 103 et câble VW3 A1 104 R10 Schneider).

Tous les états des appareils de commande (contacteurs) et de protection (relais magnétothermiques) seront remontés sur les entrées de l'automate par des contacts secs dédiés, additifs des appareils de commande et de protection.

Le contrôle de rotation de phases se fera par un relais spécifique (récupéré sur la station d'origine).

4. Devis (décembre 2007)

Sur la base de ce prototype et du cahier des charges associé, trois sociétés ont été consultées.

L'entreprise la mieux disante pour effectuer ce rétrofit se trouve être celle qui a fabriqué le système en 1992. Le montant du devis (réactualisé en décembre 2008) s'élève à environ 10 000 € TTC par système dans le cas d'un traitement global des 16 systèmes de l'académie.

5. Conclusions

Point de vue financier

Cette action de proposition d'une solution technique aux entreprises, accompagnée du dossier technique, et de la mise en concurrence des entreprises, permet aujourd'hui de proposer à la Région une nouvelle offre.

Finalement, l'entreprise la mieux disante, se trouve être la même entreprise que celle qui avait été contactée initialement. Le montant élevé de la première offre avait d'ailleurs été le déclencheur de cette opération.

L'opération de rétrofit ainsi conduite représente 29% du montant de l'achat d'un système neuf.

Point de vue pédagogique

Cette opération a permis à 8 étudiants de deuxième année préparant le BTS électrotechnique pour la session 2007 de travailler sur un projet type « rétrofit ». Les huit étudiants ont réalisé la rénovation de la partie opérative et se sont répartis en deux groupes pour réaliser chacun une armoire électrique (chacune représentative de solutions techniques différentes).

Le prototype livré à la section STI électrotechnique du lycée Philippe de Girard à Avignon comprend : la partie opérative rénovée et une nouvelle armoire électrique.

La section STS électrotechnique a conservé la deuxième armoire électrique. Comme il nous a manqué une partie opérative pour cette armoire, nous avons proposé l'année suivante, lors de la session 2008, un nouveau projet « station de pompage » pour équiper la section d'un système complet. À savoir :

- partie opérative : pompes Grundfos, débitmètre Burkert électromagnétique, capteur de pression analogique, ...

- partie commande : ATV61 + carte water solution + carte Ethernet, TeSys U, Twido, réseau Modbus, réseau Ethernet, GTC, ...

L'évolution technologique majeure qui nous a demandé, à nous enseignants, un travail important est sans aucun doute la partie communication des nouveaux matériels électrotechniques avec la mise en œuvre des réseaux Modbus et Ethernet, la programmation d'une GTC (Gestion Technique Centralisée) et donc le passage d'un canal de commande unique (pupitre armoire) à une commande multi canal (locale avec le pupitre armoire et distante avec la GTC sur un ordinateur de supervision).

Le bilan de cette action est que nous avons pu, par la suite, proposer à nos étudiants de deuxième année d'autres projets intégrant des fonctions de communications comme il est courant de rencontrer aujourd'hui :

- Projet « Automatismes » : armoire équipée d'un Twido avec pupitre local et écran tactile distant type XBTGT : communication Ethernet par courant porteur (CPL) et fonction web gate.
- Projet « Palan » : ATV31, TeSys U, API de type TSX37, coupleur Ethernet ETZ510, réseau de terrain Modbus, réseau Ethernet, GTC.
- Projet « CTA » : AT21, contacteur statique, API type Twido, écran tactile type XBT GT, GTC.
- Projet « Photovoltaïque raccordé réseau, Eolienne raccordée réseau » : onduleurs SMA, Sunnybox, webbox, écran Sunny matrix, réseau de terrain, réseau Ethernet.

6. Remerciements

Nous tenons à remercier l'entreprise **GTIE Transport** de Lyon qui nous a aidé à appréhender la problématique de la mise en œuvre d'une GTC dans un contexte réel (conduite incendie d'un tunnel autoroutier du Sinaud).

Phase	Description	Commentaires	Date
1	Système obsolète	Rénovation décidée	2006
2	Choix du lycée	Contrainte = Matériel Schneider	Réunion du 3/07/2006
3	Ecriture du cahier des charges	Contrainte = Contexte industriel ⇒ conduite incendie d'un tunnel routier	Juil-oct 2006
4	Choix du matériel – Devis fournisseurs - Définition du budget	Hydraulique & électrique	Sept-oct 2006
5	Validation du projet	Commission inter académique de validation des projets techniques	Nov 2006
6	Budget → commande	Problème : le lycée doit faire l'avance des 10 000€	mi-janvier 2007
7	Documentation du matériel Documentation des logiciels	Téléchargement - Impression - Reliure	Sept-janv 2007
8	Lecture de la documentation	ATV61, carte water solution, carte Ethernet, TeSys U avec contrôleur multifonction, Twido, Vijéo Look pour la GTC, Vijéo Designer pour l'écran tactile XBTGT2330 (finalement non implanté sur ce projet)	A partir de sept 2006
9	Réalisation	Délais de livraison un peu longs (2-3 mois)	mi-février-mai 2007
10	Essais - mise au point	Problème : la carte water solution « plante ». Après une recherche très fastidieuse, nous montrons que le problème vient du soft de la carte ⇒ le service qualité de l'entreprise nous fournit un autre matériel.	mai 2007

Tableau 1 : chronologie du projet « Rénovation station de pompage 2007 »

Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI) Bilan de fonctionnement sur une année au lycée Pierre Gilles de Gennevilliers (Digne les Bains).

Pascal DEREUMAUX, professeur agrégé de génie électrique.

Gilles DORIGNAC, professeur certifié de génie mécanique.

Sylvie SUDNIKOWICZ-CAREL, professeur de physique appliquée.

Lycée Pierre Gilles de Gennevilliers – 04000 Digne les Bains (Alpes de Haute Provence)

Résumé : Ce document présente un Chauffe Eau Solaire Individuel (CESI) installé au lycée Pierre Gilles de Gennevilliers de Digne les Bains (Alpes de Haute Provence) depuis juin 2007, système complètement instrumenté de manière à pouvoir être exploité à distance avec des élèves, lors de séances de travaux pratiques dans le cadre d'une filière « Energie et Environnement ».

L'exploitation pédagogique présentée est pluridisciplinaire, en génie électrique, physique appliquée et génie mécanique.

I. PRÉSENTATION DU SYSTÈME

Comment ça marche ? Rien de plus simple : Vous laissez un tuyau d'arrosage rempli d'eau en plein soleil... Au bout de quelques temps, l'eau qui va sortir du tuyau sera chaude, elle le sera encore plus si le tuyau est de couleur sombre, et même brûlante si une vitre est placée au dessus du tuyau. Voilà le principe du Chauffe Eau Solaire... La consommation énergétique d'un Chauffe Eau représente une part importante de l'énergie consommée dans une habitation : environ 30% pour une maison isolée suivant la réglementation en vigueur et jusqu'à plus de 60% pour une maison basse consommation.

Selon la situation géographique un CESI peut fournir 30 à 70% des besoins en eau chaude sanitaire de la maison. Depuis son lancement par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) en 2000, le Plan Soleil a permis à 39 000 foyers d'être soutenus techniquement et financièrement dans l'acquisition d'un CESI [1]. Cela représente une surface totale de capteurs installés de l'ordre de 180 000 m² (en 2007 en Métropole).

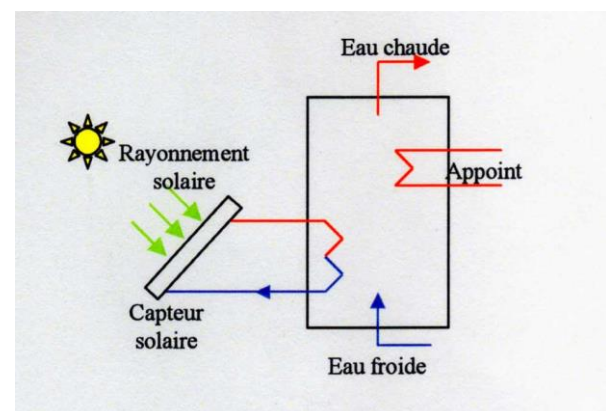
La progression du marché solaire thermique entre 2002 et 2007 est ainsi de 954% pour les chauffe-eau solaire individuels.

La préparation de l'Eau Chaude Sanitaire représente une application privilégiée de l'énergie solaire dans le bâtiment. Les besoins sont une température de l'eau chaude relativement peu élevée (entre 50 et 60 °C), une faible variation des besoins au cours de l'année contrairement au chauffage.

Le CESI installé par la société ERM de Carpentras a été instrumenté, avec l'aide de la société ACD2 [2] de manière à pouvoir effectuer des travaux pratiques et suivis à distance, via Internet [3].

Il est principalement composé de 4 m² de capteurs solaires placés sur le toit terrasse et d'un ballon d'eau chaude de 300 litres, installé dans le laboratoire d'étude des systèmes. Pour relier les capteurs et le ballon une tuyauterie calorifugée assure la circulation d'un liquide primaire (eau + héliogel).

En parcourant les capteurs placés au soleil, le liquide primaire s'échauffe avant de se diriger vers le ballon de stockage. Là, grâce à l'échangeur thermique, le liquide primaire cède les calories solaires à l'eau sanitaire du ballon. Refroidi au passage, le liquide primaire retourne au capteur, tant que l'ensoleillement reste présent. Un circulateur met en mouvement le liquide primaire tant que sa température dépasse celle de l'eau sanitaire du ballon.



Une résistance d'appoint de 2,4 kW assure la permanence du service d'eau chaude en hiver ou par période de mauvais temps.

Pour des raisons d'efficacité, la partie solaire se trouve en partie basse du ballon et l'appoint en partie haute.

Une régulation différentielle compare en permanence la température en sortie des capteurs et celle de la partie basse du ballon. Quand la différence de température dépasse 8°C, le circulateur est mis en route et le liquide primaire transmet sa chaleur à l'eau sanitaire du ballon. A l'inverse, quand la différence de température est inférieure à 8°C, la régulation arrête le fonctionnement du circulateur.

- Le ballon de 300 litres et l'automatisme. (Commercialisation par la société ERM)



- Les capteurs (4 m²) sur le toit terrasse.



Les capteurs n'ont pas été placés de manière optimale, mais permettront de par leur emplacement à tracer un masque solaire durant les séquences de travaux pratiques.

Comme décrit précédemment le système a été entièrement instrumenté de manière à pouvoir être exploité lors de travaux pratiques avec des élèves. On trouve notamment :

- des compteurs d'énergie solaire, énergie produite, énergie d'appoint, énergie de soutirage.
- des sondes de températures dans le ballon de manière à pouvoir visualiser le phénomène de stratification.

- un automate NAPAC (iRIO) muni d'un coupleur WEB intégré pour faciliter les relevés à distance.

- une sonde d'ensoleillement.

- des thermocouples pour mesurer les températures d'eau chaude et d'eau froide.

- un profil de soutirage est configurable, il permet ainsi de simuler une utilisation journalière du système.

Les compteurs d'énergie donnent également les informations du débit, de la température, de la différence de température et de la puissance.

- Les compteurs d'énergie solaire et énergie produite installés sur le système.



Le choix d'un ballon de 300 litres et d'une surface de panneaux de 4 m² représente ce qui est classiquement installé pour couvrir 60 à 70 % des besoins sur l'année d'une famille de 4 personnes.

Un bilan annuel sur l'année 2008 permet d'établir pour les données précédentes, une production solaire annuelle de 1360 kWh, soit 340 kWh/m². Un taux de couverture solaire de 65 % pour une consommation d'Eau Chaude Sanitaire de 130 litres (35 litres/jour/personne) à 50°C.

Le taux de couverture solaire moyen obtenu est conforme à ce qui était attendu et la productivité solaire est assez proche des valeurs annoncées habituellement par les constructeurs.

Selon des sources de l'ADEME [4] pour un système de cette configuration :

- le calcul des émissions de CO₂ évitées effectué sur la base des coefficients suivants, 40 g de CO₂ par kWh électrique non consommé pour l'eau chaude, donne 180 kg CO₂ soit 40 kg/m².

- l'économie d'énergie primaire annuelle est de 2600 kWh (1 kWh électrique = 2,58 kWh d'énergie primaire).

L'installation de ce type d'équipement, par un artisan, chez un particulier est d'environ 6000 € TTC, hors prime (prix en juillet 2008).

II. EXPLOITATIONS PÉDAGOGIQUES.

II.1. Génie Electrique (Electrotechnique)

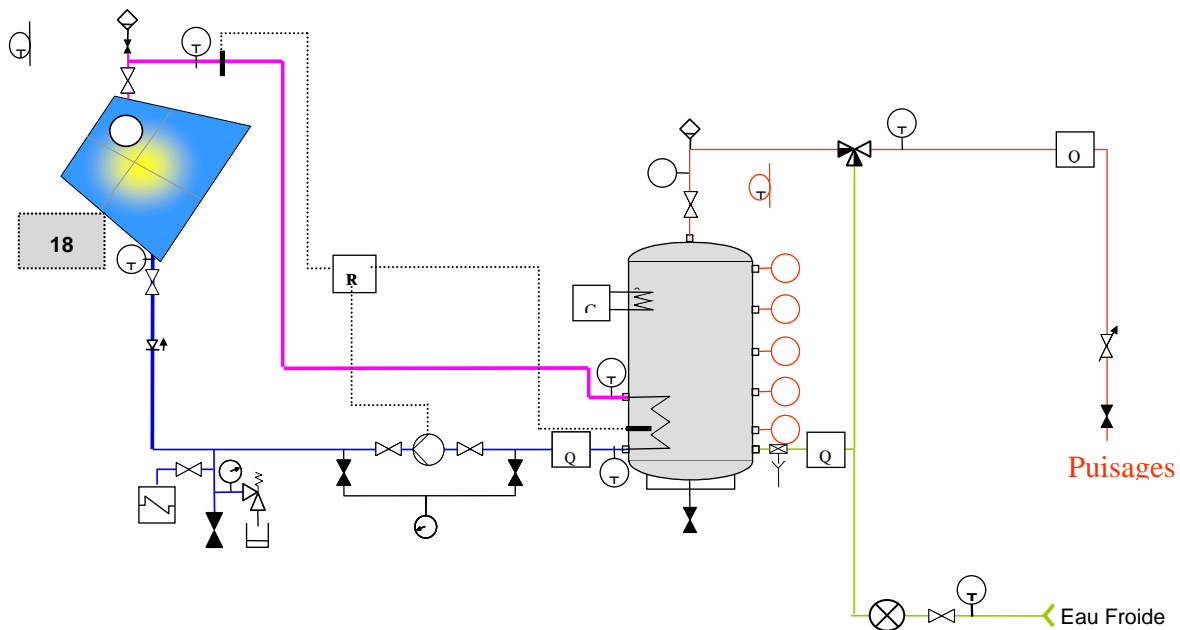
Le système est exploité depuis plus d'une année scolaire avec des élèves de première et terminale Electrotechnique.

Un premier TP en laboratoire d'Etudes des Systèmes Techniques Industriels permet aux élèves de découvrir le système et son principe de fonctionnement. Le schéma ci-dessous permet d'identifier notamment tous les constituants du chauffe Eau Solaire Individuel. Les compétences attendues sont respectivement :

- L'identification (en présence du système) de tous les constituants du CESI et leur rôle. L'élève utilise les symboles utilisés en hydraulique.
- L'étude du fonctionnement d'un Chauffe Eau Solaire et le sens de circulation des fluides.
- Le calcul de l'énergie thermique nécessaire pour faire passer la température des 300 litres du ballon de 20°C à 55°C.

- Le calcul de la dilatation volumique d'un liquide lorsque la température passe de 20°C à 135°C (température fréquemment atteinte en sortie des capteurs).
- La validation du fonctionnement de la régulation différentielle dans un tel système.
- La production d'eau chaude sanitaire et l'exploitation des mesures issues des capteurs (Energies, ensoleillement, températures...)

Un deuxième TP permet de tracer le masque solaire des panneaux, d'évaluer à l'aide du logiciel SOLO 2000 [5], l'effet d'un surdimensionnement de la surface des panneaux (diminution de la productivité mais augmentation du taux de couverture) et d'un surdimensionnement du ballon d'eau chaude (diminution du taux de couverture).



II.2. Physique appliquée.

L'accessibilité en ligne de l'installation permet d'envisager son utilisation pour des études en physique et physique appliquée d'une manière didactique et souple s'adaptant à des niveaux différents dans le cadre d'études sur l'énergie thermique et les énergies renouvelables.

Dans ce cadre plusieurs séances de travaux pratiques en seconde MPI ont été expérimenté.

A partir du schéma de principe de l'installation, différents domaines peuvent être envisagés parmi lesquels l'étude de:

- La lumière et le rayonnement
- L'effet de serre
- L'étude énergétique et le rendement

- L'écoulement et la circulation

Un rappel sur la différence entre température et chaleur est souvent nécessaire afin d'éviter toute confusion entre les 2 notions. Il peut s'avérer nécessaire de vérifier les connaissances sur les échanges thermiques et de distinguer en mettant en œuvre des expériences simples, les échanges par conduction, convection et rayonnement. A ce propos le capteur solaire lui-même peut très bien servir de support à l'étude des échanges thermiques, ainsi que celle des facteurs d'absorptivité hémisphérique globale et d'émissivité hémisphérique.

a = absorptivité hémisphérique globale

ε = émissivité hémisphérique

Matériau	a	ε
Corps noir	1	0
Brique rouge	0,75	0,93
Neige propre	0,20	0,95
Chrome noir sur cuivre	0,95	0,12
Aluminium poli	0,10	0,07
Carton goudronné noir	0,82	0,91

Le fichier historique ci-dessous est issu d'un relevé sur l'automate NAPAC. Il donne un exemple de prise de mesures de l'ensoleillement, de la température en entrée et en sortie des capteurs et de la température extérieure. Il a donné lieu à une étude du rendement du capteur.

date	Ensoleil	T_ext	T_entrée	T_sortie	ΔT	Rend théo
12/12/2007 14:20	816,29	11,85	39,75	45,4	30,725	0,5
12/12/2007 14:10	837,57	11,64	38,79	49,14	32,325	0,49
12/12/2007 14:00	855,3	11,46	37,71	43,38	29,085	0,52
12/12/2007 13:50	872,32	11,28	38,02	44,86	30,16	0,51
12/12/2007 13:40	883,66	10,92	35,04	54,05	33,625	0,5
12/12/2007 13:30	887,92	10,66	34,96	41,67	27,655	0,53
12/12/2007 13:20	903,52	10,46	34,11	42,06	27,625	0,53
12/12/2007 13:10	907,07	10,1	33,49	37,99	25,64	0,55
12/12/2007 13:00	917,7	9,74	34,11	39,05	26,84	0,54
12/12/2007 12:50	917,7	9,38	33,57	36,57	25,69	0,55
12/12/2007 12:40	909,9	9,02	32,38	37,42	25,88	0,55
12/12/2007 12:30	919,83	8,64	31,6	41,46	27,89	0,54
12/12/2007 12:20	909,19	8,25	30,75	34,99	24,62	0,55
12/12/2007 12:10	907,07	7,84	29,23	39,16	26,355	0,54
12/12/2007 12:00	906,36	7,71	27,47	33,13	22,59	0,56
12/12/2007 11:50	894,3	7,35	27,03	33,57	22,95	0,56
12/12/2007 11:40	881,54	7,07	25,82	37,73	24,705	0,55
12/12/2007 11:30	871,61	6,74	26,08	29,46	21,03	0,57
12/12/2007 11:20	847,49	6,25	25,41	32,48	22,695	0,55
12/12/2007 11:10	58,15	5,84	23,6	27,37	19,645	-1,03
12/12/2007 11:00	67,37	5,23	20,82	29,46	19,91	-0,81
12/12/2007 10:50	790,76	4,71	17,83	21,08	14,745	0,6
12/12/2007 10:40	773,03	4,33	17,42	26,65	17,705	0,57
12/12/2007 10:30	736,15	3,89	13,93	22,6	14,375	0,59
12/12/2007 10:20	704,94	3,35	8,92	13,75	7,985	0,63

Cette étude a également permis d'identifier les différentes technologies de capteurs. La performance d'un capteur solaire est souvent représentée par une courbe exprimant son efficacité en fonction d'un paramètre proportionnel à l'écart entre la température moyenne du fluide (T_m) à l'intérieur du capteur et la température extérieure (T_e).

$$\eta = \eta_0 - a_1(\Delta T / H) - a_2 \cdot \Delta T^2$$

Avec :

η : Rendement du capteur.

η_0 : Rendement du capteur sans déperdition.

a_1 : coefficient linéaire de transfert thermique. Valeur couramment comprise entre 1,2 et 4.

a_2 : coefficient quadratique de transfert thermique
Valeur comprise entre 0,005 et 0,015.

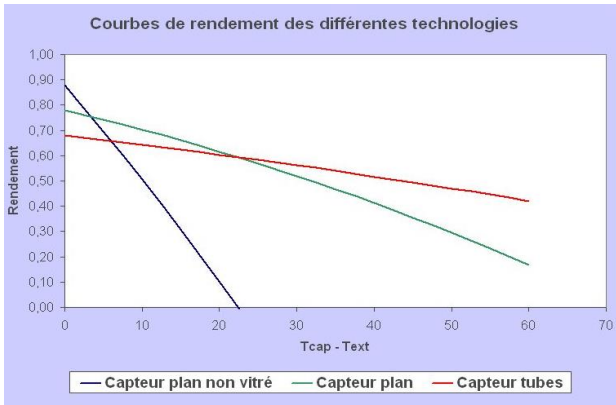
Ces paramètres sont identifiés par la norme NF EN 12975-1, et les valeurs numériques sont fournies par le fabricant du capteur solaire.

ΔT : différence entre la température moyenne du fluide caloporteur dans l'absorbeur (T_m) et la température de l'air ambiant (T_e)

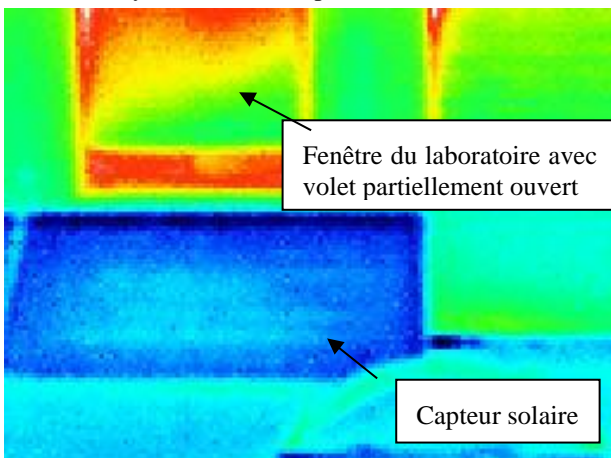
η_0 est sans dimension, les coefficients a_1 , a_2 s'expriment respectivement en [$W.m^{-2}.K$] et [$W.m^{-2}.K^{-2}$]

H: Ensoleillement [W/m^2]

Le travail demandé à l'élève a été ici de récupérer un fichier historique sur le banc CESI, de calculer le rendement théorique du capteur plan utilisé et de comparer la valeur trouvée à celle donnée par le constructeur. Une petite recherche autonome a permis ensuite aux élèves de voir qu'il existait d'autres types de capteurs solaires thermiques sur le marché.



Une exploitation pédagogique a également consisté à l'observation de l'image thermique des capteurs dans leur environnement, images obtenues avec une caméra infrarouge. Les élèves ont effectué ce relevé sur le toit terrasse du lycée, face aux capteurs solaires.



Une expérimentation, à distance a été réalisée avec des élèves, été présenté aux rencontres de l'Orme à Marseille le 25 Mars 2009.

Le texte de ce TP est téléchargeable sur le site du lycée à l'adresse mentionnée en [6].

Il n'est pas abusif de penser qu'un tel dispositif pourrait être adapté à d'autres installations et permettre ainsi la mutualisation des moyens pédagogiques disponibles au bénéfice du plus grand nombre tout en économisant des moyens

II.3 Génie mécanique

Ce système permet principalement d'aborder les sujets suivants :

- Calcul d'une énergie
- Calcul d'un rendement
- Réalisation d'un bilan énergétique

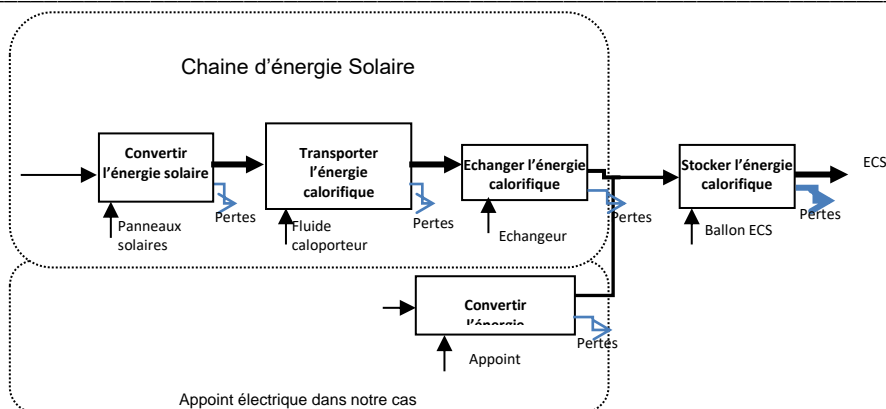
Avec la notion de :

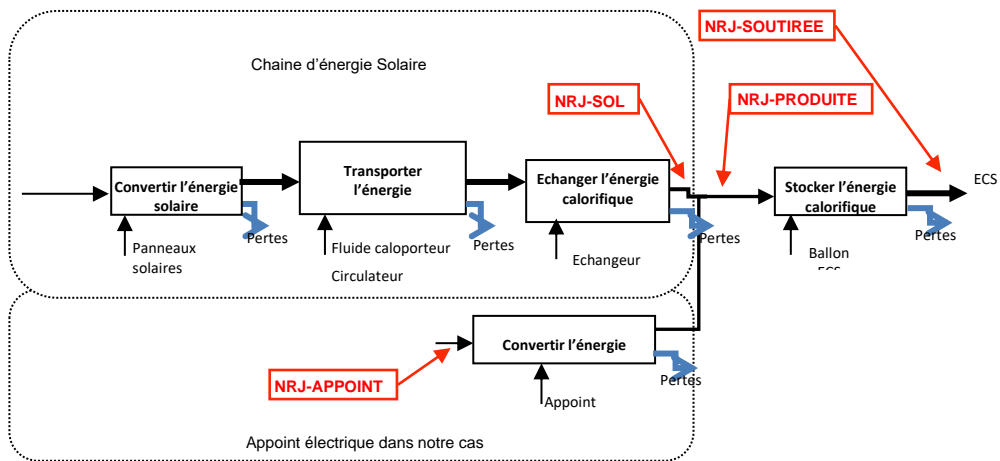
- Taux de couverture.

Un premier TP exploite les mesures réalisées sur le système dans le but d'obtenir un bilan énergétique du système et d'évaluer l'efficacité énergétique de chaque composant du système sur une période donnée.

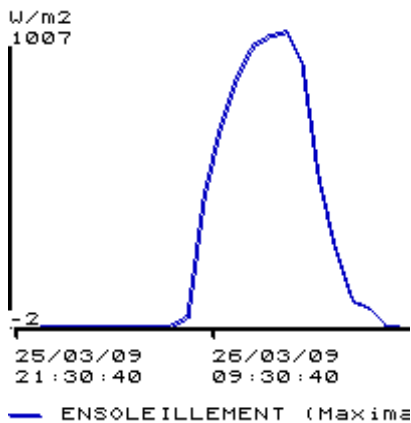
Dans un premier temps l'élève doit appréhender la chaîne d'énergie avec une approche fonctionnelle des constituants du CESI.

Il doit ensuite arriver, à partir de définitions et d'une analyse du schéma du système pour situer les compteurs d'énergie, à placer les grandeurs mesurées sur cette représentation fonctionnelle du système.

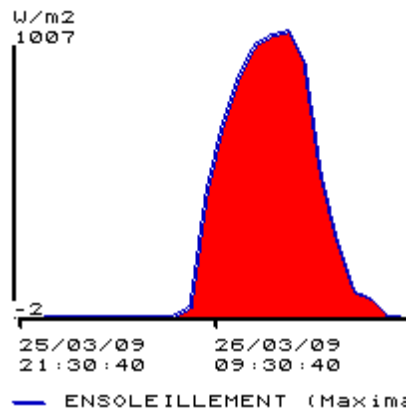




Lors de cette activité l'élève va s'apercevoir que l'énergie d'entrée dans le système n'est pas fournie. Il s'agit donc d'évaluer l'énergie reçue par le capteur à partir des mesures d'ensoleillement. La valeur de l'ENSOLEILLEMENT fournie par le système est en $[W/m^2]$.

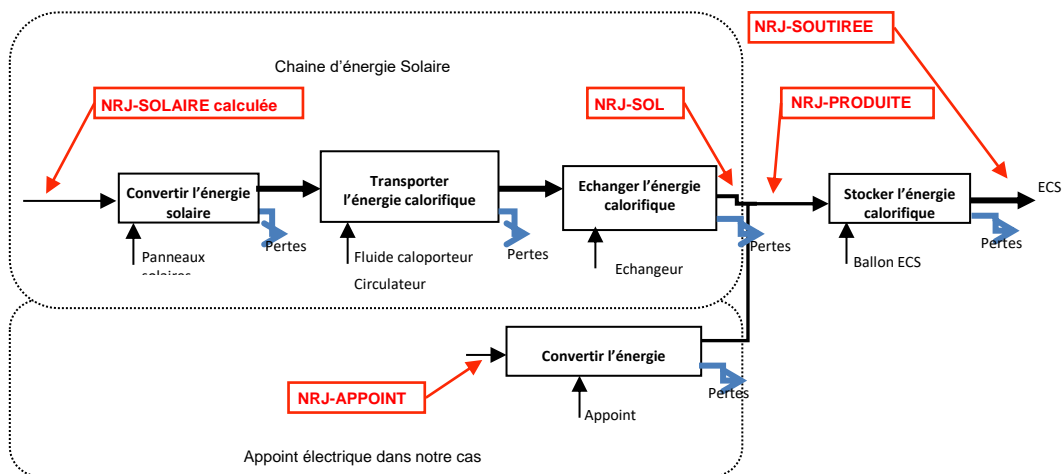


la surface de panneau mais surtout appliquer la définition de l'énergie comme le produit d'une puissance et d'un intervalle de temps.



L'utilisation d'un tableau permet de réaliser ce calcul et d'obtenir une valeur dénommée NRJ SOL Calculée. Il est ensuite possible d'exploiter les résultats numériques de manière à obtenir un rendement du système. Dans ce cas le rendement est obtenu par un rapport d'énergie et non pas comme une valeur instantanée rapport de deux puissances.

L'élève doit donc passer d'une puissance par unité de surface à une énergie reçue. Pour cela il doit connaître



date	NRJ_SOL	NRJ_PRODUITE	NRJ_SOUTIREE	NRJ_APPOINT	ENSOLEILLEMENT	NRJ SOL calculée
31/06/2007 23:50:0	339	537	516	156234	0	0
01/06/2007 00:00	109	257	251	145268	0	0
	230	280	265	10.966		1495

Les valeurs numériques ci-dessus sont pour le mois de Juin 2007.

La deuxième activité va consister à comparer ce bilan **mesuré** sur une période à la **prévision** faite par le logiciel SOLO2000, logiciel gratuit de dimensionnement d'un CESI, disponible sur le site du CSTB.

L'élève doit dans un premier temps paramétrer le logiciel pour obtenir une simulation correspondante à

sa situation géographique et matérielle. Les principales données à préciser sont :

- La situation géographique de l'installation ;
- Les références du matériel constituant l'installation ainsi que la surface de panneaux installée ;
- Les volumes classiques de consommation d'eau chaude ainsi que sa température.

Si le travail sur les masques solaire a été fait il peut aussi l'exploiter dans le logiciel de manière à affiner sa

simulation. A noter que pour cette activité l'accès physique aux panneaux est nécessaire. Il faut ensuite exploiter les résultats obtenus :

RESULTATS	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel
Couverture [%]	19	32	49	64	72	78	76	72	61	43	26	17	50
Besoins [kWh]	312	280	300	280	278	260	261	261	260	283	289	309	3373
Productivité [kWh]	61	90	146	179	202	204	199	188	157	123	76	53	1678
Productivité /m²	15	22	36	45	50	51	50	47	39	31	19	13	419

Le logiciel donne quatre valeurs numériques pour chaque mois de l'année :

- **Couverture** : le rapport de la production d'énergie calorifique d'origine solaire sur le besoin énergétique exprimé en %.
- **Besoins** : fonction de la quantité d'eau journalière à passer d'une température initiale à la température désirée (50° C dans notre cas) en kWh.
- **Productivité** : énergie calorifique d'origine solaire produite en kWh

- **Productivité /m²** : énergie calorifique d'origine solaire produite en kWh divisée par le nombre de m² installés.

Ces résultats peuvent alors être rapprochés des mesures et des calculs faits dans l'activité précédente avec par exemple pour le mois de juin et les résultats exposés précédemment.

	Simulation SOLO2000	Mesures sur le système
Couverture	79%	87%
Besoins [kWh]	260	Il s'agit ici de l'énergie réellement soutirée 265
Productivité [kWh]	204	230
Productivité/m ² [kWh/m ²]	51	57,5

Une rapide analyse de ces résultats permet de constater la proximité des prévisions par rapport aux mesures et donc d'espérer un taux de couverture annuel dans notre configuration de 50%.

III. BIBLIOGRAPHIE

- [1] ADEME : Communiqué de presse du 5 novembre 2007.
- [2] ACD2 6 rue L. Lavoisier 04000 Digne les Bains.
Contact : Vincent BAYETTI
- [3] <http://bancecs.lyc-gillesdegennes.ac-aix-marseille.fr/>
Nom utilisateur « michel », mot de passe « michel ».
Nota : Les images du banc et des capteurs ne sont pas visibles avec « MOZILLA ».
- [4] ADEME : Evaluation énergétique du plan Soleil, CESI, 10/08/2006, C.BUSCALET - D.CACCAVELLI.
- [5] SOLO 2000, logiciel gratuit de dimensionnement d'un CESI, disponible sur le site du CSTB.
- [6] <http://www.lyc-gillesdegennes.ac-aix-marseille.fr/spip/spip.php?article80>

ÉTUDE D'UN GROUPE FROID POSITIF

Bernard STRAUDO⁽¹⁾, Thierry TOURTCHOUNIAN⁽²⁾

⁽¹⁾ Professeur de physique appliquée, ⁽²⁾ Professeur de génie électrique

Lycée Don Bosco - Marseille

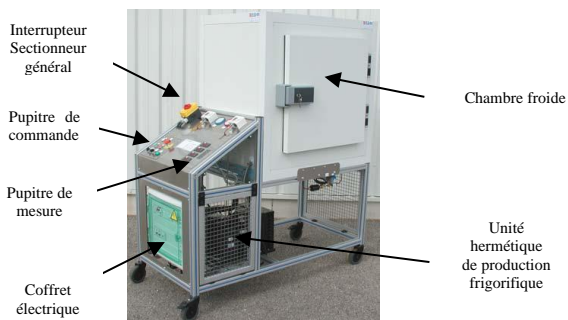
bernard.straudo@free.fr, thierry.ciotat@voila.fr

Résumé : Cet article décrit la mise en œuvre de séance de travaux pratiques autour d'un système frigorifique industriel. L'absence de thermique et de thermodynamique dans les programmes actuels de STI génie électrotechnique nous contraint à donner de nombreuses informations à nos élèves. Nous avons essayé de trouver un compromis entre le vocabulaire utilisé en thermodynamique et celui de la vie courante pour tenter d'être le plus rigoureux possible tout en étant compris des élèves.

I. PRÉSENTATION

Le sujet de cet article est un groupe froid positif, dont le rôle est de refroidir des aliments et les maintenir à une température qui reste positive (4°C).

Ce système (de la société ERM) est composé d'une enceinte isolante, d'un système de refroidissement régulé et d'un ensemble de capteurs permettant son exploitation pédagogique.



Ce système permet d'aborder avec des élèves de STS et de STI électrotechnique les savoirs suivants :

- Thermodynamique
- Mécanique des fluides
- Electrotechnique :
 - o Fonction « convertir »
 - o Fonction « protéger »
 - o Fonction « réguler »

Cette étude nous permettra ensuite d'aborder l'étude des pompes à chaleur et de sensibiliser les élèves aux économies d'énergie.

De plus, ce système offre une autre vision de la régulation de température habituellement dédiée à la production de chaleur dans nos sections.

II. LA PRODUCTION DU FROID

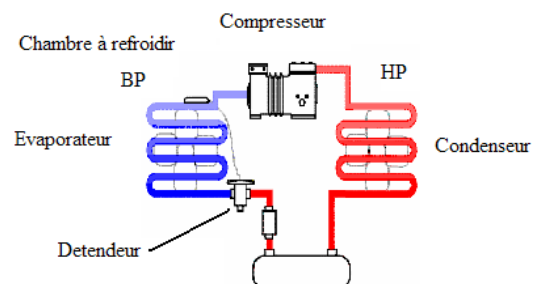
Pour comprendre le mécanisme de la production de froid, on peut prendre l'exemple du corps humain. En effet lorsque nous transpirons, la sueur produit une sensation de froid, car l'évaporation nécessite un apport d'énergie prélevée sur le corps humain (voir le § IV chaleur latente).

Pour une chambre froide, le principe est identique : la vaporisation d'un liquide (le fluide frigorigène) prélève de l'énergie thermique à l'intérieur de la chambre et ainsi la refroidit.

III. LA MACHINE FRIGORIFIQUE

Elle est constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide frigorigène à l'état liquide ou gazeux et comprend quatre éléments principaux qui sont :

- 2 échangeurs de chaleur,
- 2 éléments permettant les changements de pression.



III.1. Les échangeurs de chaleur

L'évaporateur :

C'est un échangeur de chaleur fonctionnant à basse pression qui est directement placé dans l'enceinte à refroidir. Le fluide frigorigène s'y évapore en prélevant l'énergie nécessaire à l'intérieur de l'enceinte, d'où le refroidissement qui s'y produit.

Le condenseur :

C'est un échangeur de chaleur fonctionnant à haute pression. Le fluide frigorigène s'y condense en fournissant de l'énergie thermique à l'extérieur de l'enceinte.

III.2. Le changement de pression

Le détendeur :

C'est un dispositif de détente isenthalpique des hautes pressions (HP) en basses pressions (BP)

Le compresseur :

Il est alimenté par le réseau de distribution électrique. Il aspire les vapeurs du fluide frigorigène du circuit basse pression et les comprime dans le circuit HP.

IV. CONNAISSANCES DE THERMODYNAMIQUE

Remarque : On note en minuscule les valeurs massiques, en majuscules les valeurs non massiques.

T représente la température exprimée en Kelvin (K)

Δh est la variation d'enthalpie massique exprimée en Joule (J.kg^{-1})

Chaleur latente l (J.kg^{-1}) : C'est la quantité d'énergie massique (par une unité de masse) qu'il faut fournir à un corps pour le faire changer d'état (solide, liquide ou gazeux).

L'énergie nécessaire L pour faire passer un corps de masse m , d'un état à un autre est donnée par la formule suivante :

$$L = l m$$

Avec m : masse de ce corps en kilogramme.

Remarque : le diagramme de Mollier (§ VI) permet d'éviter les calculs. Dans ce diagramme, la chaleur latente massique s'identifie aussi à la variation d'enthalpie massique de ce corps.

$$l = \Delta h$$

Δh est la variation d'enthalpie massique du corps lors du changement de phase. On obtient les enthalpies massiques h par simple lecture du diagramme de Mollier.

Courbe de saturation :

Courbe qui délimite le domaine d'équilibre entre la phase vapeur et la phase liquide d'un même corps.

Capacité thermique massique c ($\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$) :

C'est l'énergie massique (par unité de masse) qu'il faut fournir à un corps pour élever sa température d'un Kelvin.

L'énergie nécessaire pour augmenter la température d'un Kelvin d'un corps de masse m , est appelée capacité thermique C et elle est donnée par la formule suivante :

$$C = c m$$

Avec m : masse de ce corps en kilogramme

Le refroidissement des aliments se fait à pression constante. Le transfert d'énergie par chaleur Q , nécessaire pour élever un corps de capacité thermique C de la température T_1 à la température T_2 est donnée par la formule suivante :

$$Q = C (T_2 - T_1) = m.c (T_2 - T_1) .$$

L'abaissement effectif de température des aliments dépendra donc de leur capacité thermique : plus elle est faible, plus la mise à température des aliments sera rapide (de même pour l'enceinte)

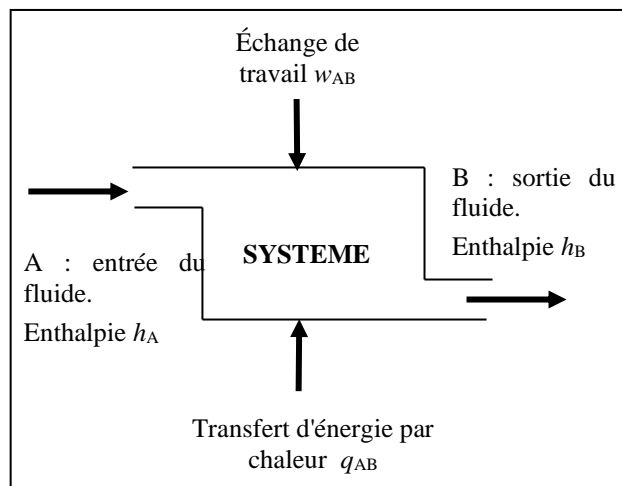
La capacité thermique d'un litre d'eau vaut 4820 J

Résistance thermique R_{TH} (K.W^{-1}) : caractéristique d'un matériau à empêcher les échanges thermiques.

$$R_{TH} = \frac{T_2 - T_1}{P}$$

P (exprimée en Watt) étant la puissance transférée par chaleur ou flux thermique, à travers la paroi séparant les deux milieux de température respective T_1 et T_2

Il est évident que plus la résistance thermique de l'enceinte du groupe froid sera grande, meilleure seront les performances du système.



Premier principe de la thermodynamique

Le premier principe (version massique), appliqué aux fluides en écoulement de A vers B s'écrit :

$$q_{AB} + w_{AB} = h_B - h_A$$

V. ÉTUDE DE L'ÉNERGIE NÉCESSAIRE

En exploitation, le système de refroidissement doit :

- Refroidir les aliments introduits et donc prélever l'énergie :

$$Q = C (T_{\text{enceinte}} - T_{\text{initiale}})$$

Où C correspond à la capacité thermique des aliments qui entrent dans l'enceinte et T_{initiale} leur température au moment de l'entrée.

La durée de ce refroidissement dépendra de la puissance du groupe frigorifique.

Remarque : à la mise en service de l'enceinte avec des aliments, l'énergie est plus grande car il s'agit de refroidir à la fois les aliments et l'enceinte

$$Q = C_{\text{totale}} (T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}).$$

- Compenser en permanence la puissance perdue à travers les parois de l'enceinte :

$$P = \frac{T_{\text{ext}} - T_{\text{enceinte}}}{R_{\text{TH}}}$$

VI. ÉTUDE DU DIAGRAMME DE MOLLIER

Pour suivre l'évolution du fluide frigorigène et dimensionner une installation, on utilise le diagramme de Mollier. Ce diagramme, a pour ordonnée la pression (en échelle logarithmique) et pour abscisse l'enthalpie.

La courbe de saturation délimite les zones où le fluide frigorigène est à l'état liquide, à l'état gazeux et où il se trouve en équilibre dans les deux états.

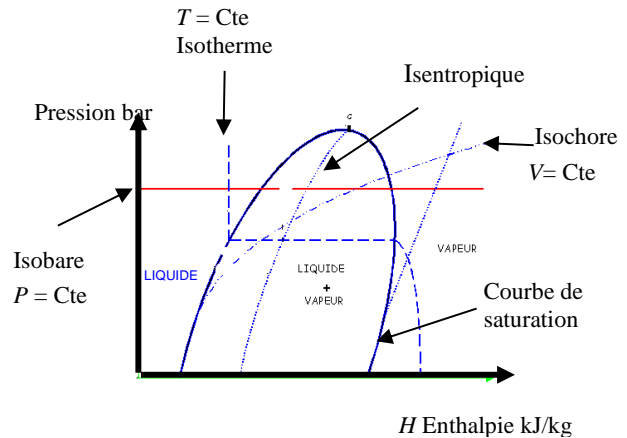
Les points présentant le même titre, c'est-à-dire le même pourcentage de vapeur dans la zone d'équilibre des 2 états, forment des courbes appelées : *isotitres*.

Les *isochores* sont des courbes où en chaque point, le fluide présente un volume massique constant.

Les *isobares* sont des courbes où en chaque point, le fluide présente une pression constante.

Les *isothermes* sont des courbes où en chaque point, le fluide présente une température constante.

Les *isentropiques* sont des courbes où en chaque point, le fluide présente une entropie constante.



VI.1. Tracé de la phase de compression

(voir diagramme correspondant page suivante)

Le compresseur aspire les vapeurs saturées à 2 bar et à la température de 10 °C. Ce point (H1) se situe à l'intersection de l'isobare à 2 bar et de l'isotherme à 10 °C.

La compression considérée est une transformation isentropique (c'est-à-dire une compression sans transfert d'énergie par chaleur : $q_{12} = 0$).

Le point de sortie (H2) est situé à l'intersection de l'isobare à 16 bar et de l'isotherme à 62 °C.

Pendant la compression, $q_{12} = 0$, le travail reçu par le fluide et venant du compresseur est donc :

$$w_{12} = (h_2 - h_1) = 440 - 410 = 30 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

VI.1. Tracé de la phase de condensation

(voir diagramme correspondant page suivante)

La condensation est une transformation isobare, on a donc ici un travail reçu par le fluide frigorigène ($w_{23} = 0 \text{ J}$).

Elle correspond à une droite horizontale sur le diagramme de Mollier.

À la sortie du condenseur, le fluide est saturé (c'est-à-dire 100% liquide) et reste à la même température pendant cette transformation.

Son rôle est d'évacuer la chaleur absorbée par le fluide à l'évaporation et l'énergie reçue par le fluide lors du travail de compression.

L'énergie thermique évacuée est :

$$q_{23} = h_3 - h_2 = -200 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Le fluide cède effectivement 200 kJ.kg⁻¹ à l'environnement extérieur au groupe froid : si celui-ci refroidit les aliments, il réchauffe aussi la pièce dans laquelle il se trouve.

VI.2. Tracé des phases de détente et d'évaporation

La détente :

La détente considérée est une transformation isenthalpique, elle correspond à une droite verticale sur le diagramme de Mollier (passage du point H3 au point H4). La pression passe de 16 bar à 2 bar. Une partie du fluide s'est vaporisée lors de cette transformation.

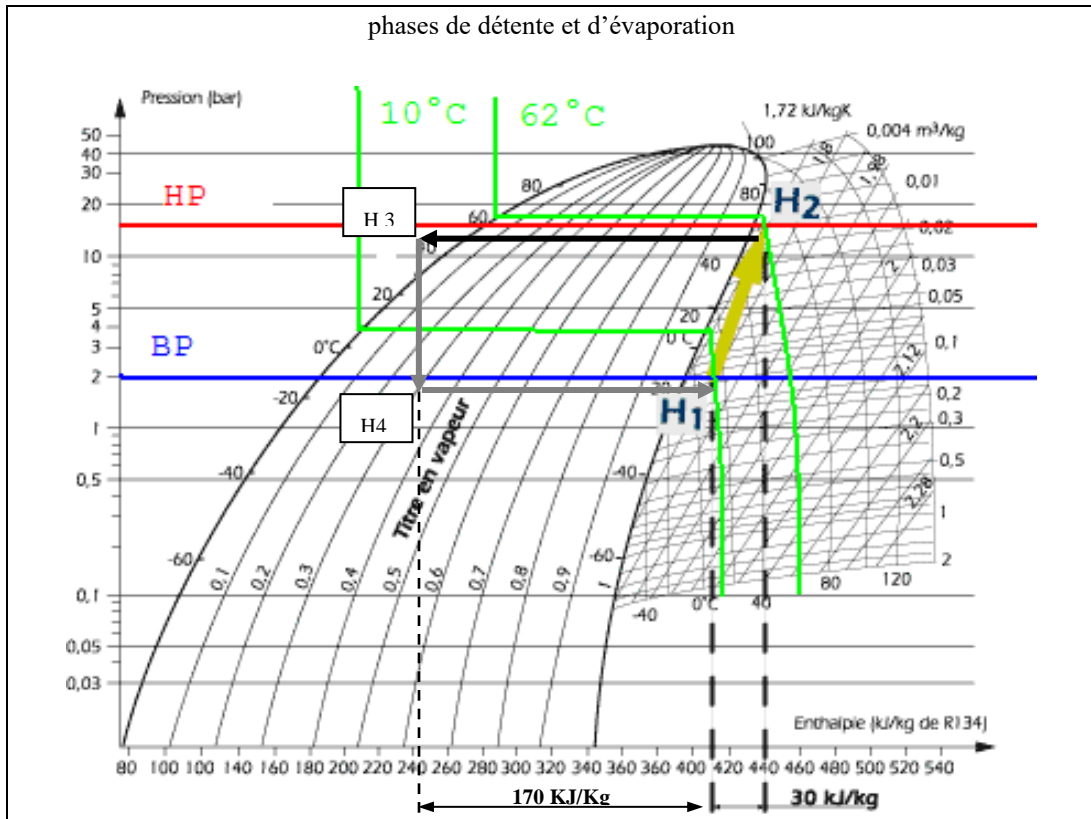
L'évaporation :

En s'évaporant, le fluide va prendre de l'énergie au contenu de l'enceinte.

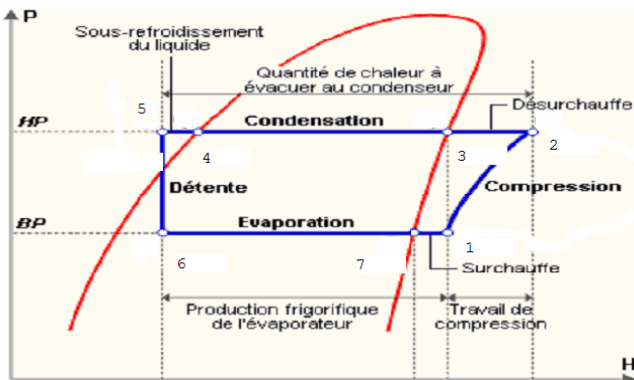
L'évaporation se fait à pression constante ($w_{41} = 0$ J), Elle correspond à une droite horizontale sur le diagramme de Mollier (passage du point H4 au point H1).

Dans notre exemple, la chaleur massique absorbée par le fluide est:

$$q_{41} = h_1 - h_4 = 410 - 240 = 170 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

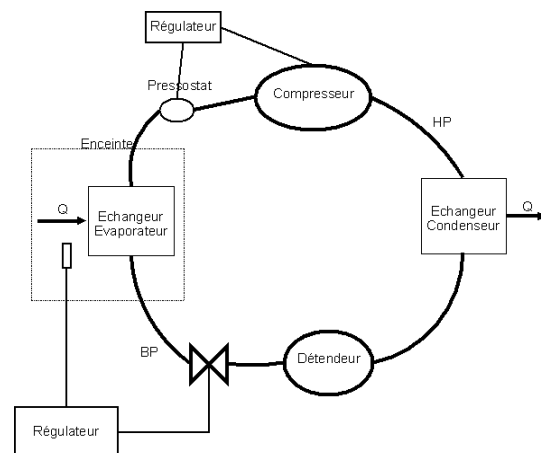


Le cycle parcouru par le fluide frigorigène est résumé ci-dessous :



VII. ÉTUDE DE LA BOUCLE DE RÉGULATION

Afin de maintenir une température intérieure la plus constante possible, une boucle d'asservissement doit être réalisée.



La société ERM a choisi, pour son groupe froid, la régulation suivante :

- Le régulateur agit sur une électrovanne placée sur le circuit basse pression et sur la mise en marche du compresseur.
- L'électrovanne est commandée par la température intérieure de l'enceinte.
- Le compresseur est commandé par la pression dans la partie basse pression du circuit.

VIII. DIFFÉRENTES ACTIVITÉS PROPOSÉES AUX ÉLÈVES

Les TP sont systématiquement proposés à des binômes d'élèves lors de TP tournants.

VIII.1. Essais

Trois types d'essais correspondants à des situations rencontrées lors du fonctionnement du système sont plus particulièrement étudiés.

VIII.1.a. Mise en température

Lors de celle-ci, le groupe froid doit refroidir l'enceinte, l'air et les ustensiles contenus dans l'enceinte et compenser les pertes par les parois.

VIII.1.b. Régime établi

En régime établi, le groupe froid doit seulement compenser les pertes par les parois.

VIII.1.c. Refroidissement d'un plat chaud

Dans ce cas en plus de la compensation des pertes, le groupe froid doit abaisser la température du plat à la température désirée.

VIII.2. T.P. niveau bac STI

Trois TP sont proposés à des binômes d'élèves

TP 1 : Prise en charge du système :

Objectifs :

- Découvrir le système
- Mise en marche de la chambre froide
- Vérification des conformités du produit par rapport à sa plaque signalétique

TP 2 : Tracé du diagramme de Mollier

Questionnement :

- Dans le cadre du contrat de la maintenance d'une installation frigorifique, vous êtes chargés d'effectuer des relevés et d'en exploiter les résultats.

TP 3 : Bilan énergétique

Objectifs :

- Mesurer la variation température lors du refroidissement.
- Mesurer l'énergie électrique consommée.
- En déduire l'efficacité thermique de cette machine.

VIII.3. T.P niveau STS électrotechnique

Ce système est aussi bien utilisé en physique appliquée qu'en STI. Nous pouvons mettre ainsi en évidence l'intérêt de la modélisation des systèmes industriels.

TP 1 : Étude énergétique (physique appliquée)

Prés-requis :

- Résistance thermique d'une paroi.
- Capacité thermique d'un corps.
- Energie et puissance thermique.
- Système du premier ordre.

Questionnement :

- Afin de dimensionner le système de refroidissement, vous êtes chargés d'évaluer la quantité de chaleur à évacuer.

Objectifs :

- Calcul de l'énergie et de la puissance thermique à évacuer pour amener l'enceinte et les plats à la température désirée.
- Calculer la puissance à évacuer pour maintenir l'enceinte à la température désirée.
- Réaliser le schéma équivalent (modèle électrique du système thermique).
- Calculer la constante de temps.

TP 2 : Régulation thermique (STI)

Objectif

- Identification de la boucle de régulation.
- Visualiser des durées de fonctionnement du compresseur, des instants d'ouverture et de fermeture de la vanne.
- Relevé de l'évolution de la température intérieure.
- Relever les températures de déclenchement du compresseur.

IX. CONCLUSION

L'étude de ce système permet une approche différente de notions d'électrotechnique et de physique appliquée pour des classes de STS électrotechnique et de STI.

Ce système offre aussi la possibilité d'utiliser une supervision et ainsi développer une autre partie des savoirs des filières d'électrotechnique. Une utilisation à distance et sur plusieurs postes en simultané est possible.

Remerciement : Nous remercions tout particulièrement M. Marc HAZART, professeur de sciences physiques en STS CIRA au lycée Pierre Mendes-France de Vitrolles pour son aide précieuse à la rédaction du paragraphe "*Connaissances de thermodynamique*"

Système de radiographie de pièces composites pour l'aéronautique

Sandrine BASQUIN⁽¹⁾, Vincent FERRERI⁽²⁾, René AMORETTI⁽³⁾, Pierre TREHIN⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Agrégée physique appliquée, ⁽²⁾ Certifié génie électrique, ⁽³⁾ Agrégé génie électrique,

⁽⁴⁾ Agrégé de génie mécanique

Lycée Paul VINCENSINI, BASTIA

Résumé : Cet article présente l'étude et la mise en œuvre d'une commande de positionnement d'axes numériques par automate programmable industriel. L'originalité de ce projet réside dans la mise en œuvre des concepts de commande optimale des processus implémentés sur un outil programmable bas de gamme. Il s'agit d'un projet du BTS MAI du LGT Paul VINCENSINI à BASTIA pour le compte de la société Corse Composite Aéronautique (CCA) installée à AJACCIO.

1. Présentation du problème

L'entreprise Corse Composite Aéronautique, fabrique des pièces en composite entrant dans l'assemblage d'aéronefs pour des donneurs d'ordre internationaux.

Toutes les pièces sont contrôlées par un système de radiographie à rayon X. Ce système est constitué d'un émetteur et d'un récepteur positionné en regard l'un de l'autre et montés sur des axes verticaux. La pièce à contrôler est accrochée à un convoyeur horizontal qui permet de la faire défiler entre l'émetteur et le récepteur selon une direction horizontale que nous appellerons X. L'opérateur dispose d'un écran de contrôle, à l'extérieur de la cabine, sur lequel il vérifie la densité de la structure et décèle les éventuels défauts.

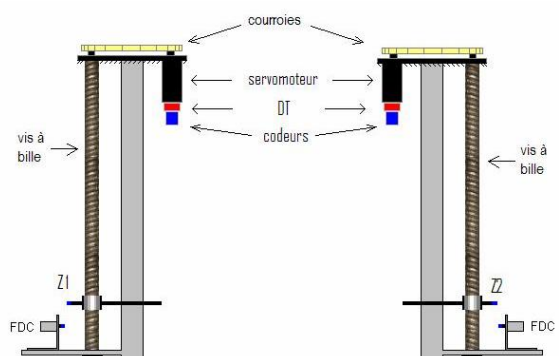
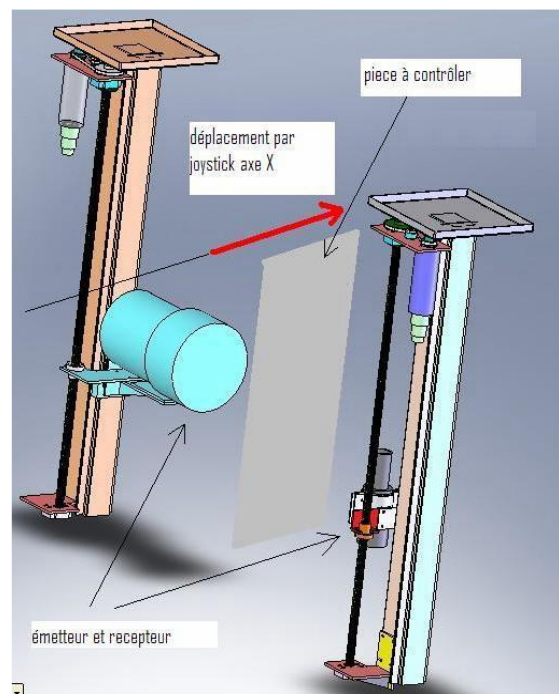
Jusqu'ici les axes verticaux étaient positionnés manuellement à différentes cotes prédéfinies, puis la pièce à contrôler subissait un balayage horizontal commandé par l'opérateur depuis son poste de contrôle à l'aide d'une commande par joystick selon l'axe X

Le but du projet a consisté à automatiser les déplacements des axes verticaux, que nous appellerons ci-dessous Z1 et Z2, de sorte que l'opérateur puisse les déplacer depuis son poste de contrôle à l'aide d'une autre commande de type joystick selon Z. **La contrainte étant de maintenir l'émetteur et le récepteur en regard l'un de l'autre sans liaison mécanique.**

2 Principe du système mis en œuvre

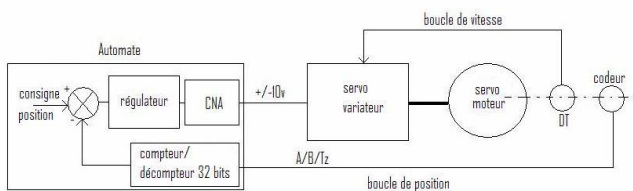
2.1. Choix des actionneurs et principe de la partie opérative

Chaque axe est animé par un moteur à courant continu associé à une dynamo tachymétrique et un codeur incrémental (voir ci-contre, les caractéristiques sont données plus loin). Ce moteur est associé, par l'intermédiaire d'un jeu de poulie et d'une courroie, à une vis à bille verticale sur laquelle l'émetteur ou le récepteur se translatent.

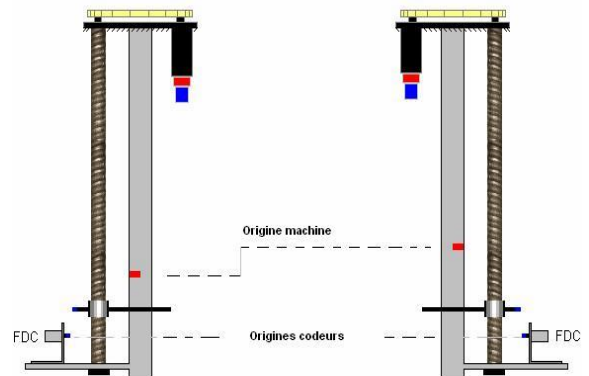


2.2. Choix des éléments de la commande

Le système est bâti autour d'un automate programmable TWIDO de Schneider Electric, intégrant un module de conversion numérique analogique 2 voies, et 2 compteurs/ décompteurs rapides. La chaîne de commande est constituée, pour chaque axe, d'un variateur de vitesse associé à un servomoteur à courant continu. La consigne de vitesse est délivrée par la carte CNA (+/- 10v). La boucle de vitesse est gérée dans le variateur par un retour tachymétrique. La boucle de position est gérée par l'automate. La position est déterminée à l'aide d'un codeur incrémental dont les signaux (A,B, Tz) sont câblés sur l'API.



Ce fonctionnement nécessite l'initialisation des codeurs (RAZ des compteurs/ décompteurs) et une prise d'origine machine de manière à définir le même référentiel sur les deux axes. Cette procédure n'est pas décrite dans ce document.



3 Principe de la commande

Les axes sont pilotés de 2 manières

- **commande en vitesse** : c'est une commande très simple qui consiste à transmettre au variateur sélectionné (choix par commutateur) une consigne de vitesse, positive ou négative par lecture de l'état d'un joystick fonctionnant en tout ou rien, en ménageant un rampe d'accélération et de décélération
- **commande en position** : dans ce cas les deux axes fonctionnent simultanément. La consigne de position d'un axe (ici Z2) est égale à la position mesurée de l'autre axe (ici Z1). Ainsi, lorsque l'opérateur actionne dans un sens ou dans l'autre le joystick, l'automate détermine une consigne glissante de position sur Z1 et fournit à Z2 la consigne égale à la position mesurée de Z1. les incréments de consigne de position, δz , sur Z1 sont naturellement déterminés en fonction de la dynamique des axes.

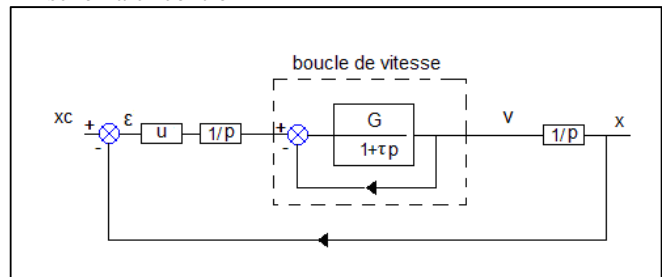
L'algorithme de principe est donc le suivant

A chaque instant $t+dt$ (dt =période d'échantillonnage)
 Si action + sur le joystick alors
 Consigne_position_z1 à $t+dt$ =
 consigne_position_z1 à $t + \delta z$
 Si action - sur le joystick alors
 Consigne_position_z1 à $t+dt$ =
 consigne_position_z1 à $t - \delta z$
 Consigne_position_z2 = position_z1

4 Choix de la méthode de commande.

Pour satisfaire la principale contrainte permettant de maintenir au maximum les axes en regard l'un de l'autre nous avons opté pour une commande optimale basée sur les théories des systèmes linéaires stationnaires à temps minimum. Cette commande permet d'obtenir un écart de poursuite à peu près nul à vitesse constante. (cf commande optimale des processus, tome IV, R.Bourdarel, J.Delmas, P.Guichet, chapitre VI : DUNOD)

Considérons une commande en accélération u/p. La boucle de commande est alors modélisée selon le schéma ci-contre



Avec :

- u la commande d'accélération ($|u| \leq \gamma$)
- v la vitesse de l'axe
- ε l'écart consigne (xc)-position (x)
- γ accélération maximale

Pour des paramètres G et τ bien choisis, la boucle de vitesse se comporte comme un gain unité. Le système se réduit alors à un deuxième ordre :

$$v' = u$$

$$\varepsilon' = v$$

L'équation d'état s'écrit : $[v', \varepsilon']^T = A [v, \varepsilon] + Bu$ (1)

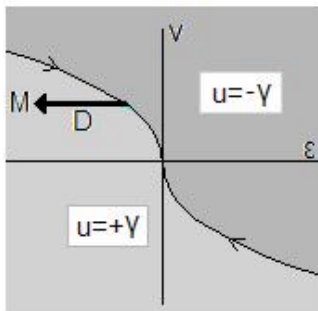
$$\text{Avec } A = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \text{ et } B = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}$$

L'objectif de la commande est d'amener la sortie sur sa consigne en temps T minimum ($\varepsilon(T)=0$) sous la contrainte $|v| \leq V_{max}$

L'étude théorique démontre que la commande u est égale à $\gamma \cdot \text{signe}([\varepsilon', |\varepsilon'| + 2 \cdot \gamma \varepsilon])$ avec au plus 2 commutations pour amener la sortie sur la consigne

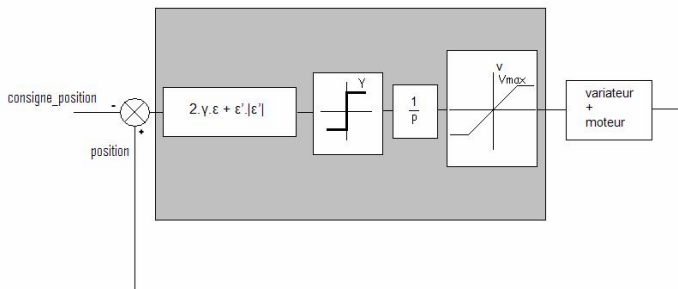
La résolution de (1) donne alors : $v^2 = +/- 2 \gamma \varepsilon$ (2)

Dans l'espace d'état (v,ε), la fonction (2) représente des paraboles de commutation conformément au schéma ci-dessus, présentant les courbes de commutation.

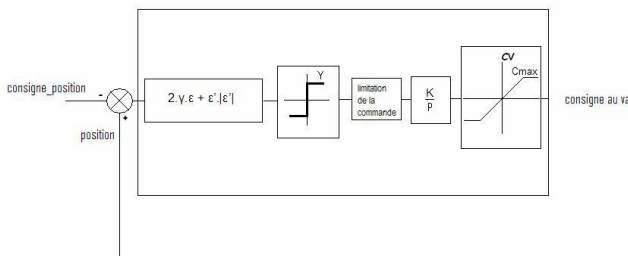


Courbes de commutation

Le schéma bloc de la commande en boucle fermée est donc le suivant :



En introduisant un gain ajustable K le schéma bloc de la commande devient (CV étant la consigne à fournir au variateur de vitesse)



Limitation de la commande :

La distance D (voir courbes de commutation) de la parabole au point M(ε₀,v₀) est égale à $(v_0|v_0| + 2 \gamma \varepsilon_0) / 2 \gamma$. Pour éviter le franchissement de la courbe de commutation on applique en définitive les commandes ci-dessous :

$D < 0, v_0 < 0$	$u = + \gamma$
$D > 0, v_0 > 0$	$u = - \gamma$
$D < 0, v_0 > 0$	$u = \min(\gamma ; (-v_0 - D) / (1 + v_0 / \gamma))$
$D > 0, v_0 < 0$	$u = \max(-\gamma ; (-v_0 - D) / (1 + v_0 / \gamma))$

Algorithme détaillé

A chaque instant t, on appelle :

ε^{-t} : valeur de l'écart à t-dt

X : position actuelle

Xc : consigne de position

dt : période d'échantillonnage

L'automate exécute alors l'algorithme suivant :

```

ε = X-Xc
V=(ε - ε-t)/dt
D0= (V*|V| + 2*γ ε)/2*γ
Lim_acc = (-V-D0)/(1+|V|/γ)

Si D0 <= 0
  Cmde_Opt = γ
  Si V >=0
    Si γ > Lim_acc
      Cmde_opt = Lim_acc
Sinon
  Cmde_opt = -γ
  Si V <=0
    Si Lim_acc > -γ
      Cmde_opt = Lim_acc
ε-t = ε
CV = CV + Cmde_opt*K
Si CV >0
  Si CV > Cmax
    CV = Cmax
Sinon
  Si CV < -Cmax
    CV = - Cmax
  
```

5 Mise en œuvre de la commande

5.1 Automate programmable :

Il s'agit d'un ensemble modulaire TWIDO :

base : TWDLMDA20DTK (12 entrées 24 Vcc, 8 sorties transistor 0.3 A)

Extension : TWDDMM24DRF (16 entrées 24 Vcc, 8 sorties à relais)

CNA : TWDAVO2HT (2 sorties analogiques +/-10V 11 bits + signe)

Les automates TWIDO se programment essentiellement à l'aide l'un langage à contact avec la possibilité d'intégrer du grafcet. (Une autre possibilité est le langage « LIST », non retenue ici du fait de son manque

de lisibilité). Le logiciel est gratuit et en ligne sur le site Télémechanique.

5.1.1. Remarques sur la programmation de la boucle de position avec le TWIDO

Pour satisfaire les contraintes de temps réel, nous avons paramétré l'UC en mode périodique avec une valeur de 20 ms.

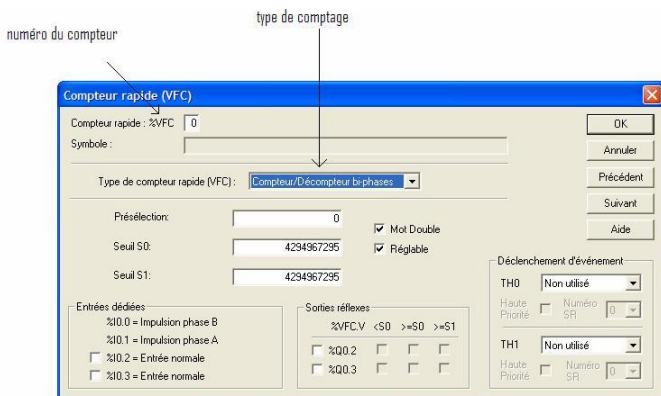
- cette référence d'automate n'utilise pas les variables réelles (REAL) (ce fut malheureusement une découverte pendant la programmation). Ceci nous a contraint à programmer en entier 32 bits avec de nombreuses contorsions pour garantir la précision des calculs ;
- autre découverte, les blocs opérations du TWIDO n'autorisent qu'une seul opérateur à la fois (*, /, +, -). Cette contrainte enlève beaucoup de lisibilité au programme ;
- en revanche, la capacité mémoire de l'automate ne pose aucun problème ainsi que sa rapidité (la période de 20 ms s'est avérée largement tenable) ;
- la mise en œuvre du grafcet est plutôt simple bien que n'utilisant pas d'interface graphique

5.1.2. Raccordement des codeurs incrémentaux et éléments de programmation.

Un avantage du TWIDO est d'intégrer sans coût supplémentaire des fonctions de comptage rapide 32 bits jusqu'à 20 KHz. Cette fonction mobilise tout ou partie des 8 premières entrées TOR.

Dans notre application nous avons utilisé cette possibilité pour raccorder les 2 codeurs incrémentaux).

- Déclaration des codeurs



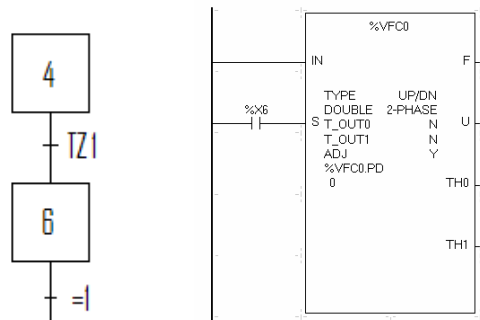
- Déclaration des entrées de remise à zéro des codeurs (top au tour Tz)

Le Tz du codeur 1 est câblé sur l'entrée %I0.2 (%I0.5 pour le codeur 2).

Les sous programmes associés sont déclenchés sur front montant sur ces entrées (SR0 pour le codeur 1 SR1 pour le codeur 2).



La procédure suivante a été mise en œuvre. L'étape 4 attend le déclenchement de SR0. L'étape 6 provoque la RAZ du compteur.



5.1.3. Avantages et inconvénients des automates TWIDO

AVANTAGES
Automate compact doté d'une gamme étendue d'entrées sorties
prix très attractif (l'ensemble comprenant le module de base TWDLMDA20DTK, les deux extensions TWDDMM24DRF, TWDAVO2HT, et un afficheur Magelis XBTR400 ne dépasse pas 800€)
Rapidité et taille mémoire : Pour cette application environ 30% des ressources mémoires seulement ont été utilisées.
Possibilité d'intégrer au moindre coût du comptage rapide jusqu'à 20 KHz
Backup et restauration automatique du programme dans la mémoire EPROM intégrée
Logiciel de programmation gratuit

INCONVENIENTS

programmation limitée au langage à contact (ou LIST !!)
Difficulté de choisir les bonnes références d'UC, avec pour certaines d'entre elles des limitations dans la représentation des données (pas de REAL par exemple pour la référence choisie)
Les blocs opérations n'utilisent qu'un seul opérateur à la fois
Pas de possibilité de structurer les applications. De ce fait les applications manquent de lisibilité et leur maintenance devient vite compliquée
La liste des symboles est unique (les types de données sont mélangés)

6 Moteur et variateur

Il s'agit de produits PARVEX constitué pour chaque axe :

- d'un servomoteur à CC à aimant de ferrite associé à une dynamo tachymétrique TBN 206 , un codeur C4-250 Points/tour et un frein électromagnétique 1.5 Nm
 - o couple 1.08 Nm – 54 V – 7.8 A 3000 t/min
 - o inertie 50Kg.m²
 - o protection IP40
- D'un variateur pour moteur ci-dessus
 - o Tension d'entrée 48 Vac
 - o Tension de sortie nominale 60V
 - o Courant de sortie nominal 10A (impulsionnel 20A)
 - o Résistance de freinage intégrée
- D'un transformateur 0.63 KVA 48 V mono (tension primaire 230V/400V)
- D'un filtre réseau 20A RTS

7 photos de la partie opérative



Exploitation pédagogique d'un banc didactique de chauffage

Karim BEJAOU

Agrégé de Physique Appliquée
Karim.bejaoui@orange.fr
Lycée DON BOSCO - NICE

Jean-Denis HARQUET

Certifié GET
jean-denis.harquet@ac-nice.fr

Jean-Yves MURGUE

Agrégé GET
jean-yves.murgue@ac-nice.fr

Résumé : nous allons présenter dans cet article, quelques exploitations pédagogiques qui ont été élaborées suite au développement du système d'électrothermie. Ce système didactique a été réalisé par MM. HARQUET & MURGUE pour les académies de Nice et de Corse et prend pour base un système réel industriel d'électrothermie. Deux exemples de T.P. sont ici développés, un sur la partie « commander la puissance », l'autre sur la partie « régulation de température ». Ce système sert de support de formation en classe de STI GET.

LE SYSTÈME INDUSTRIEL ET LE SYSTÈME DIDACTISÉ

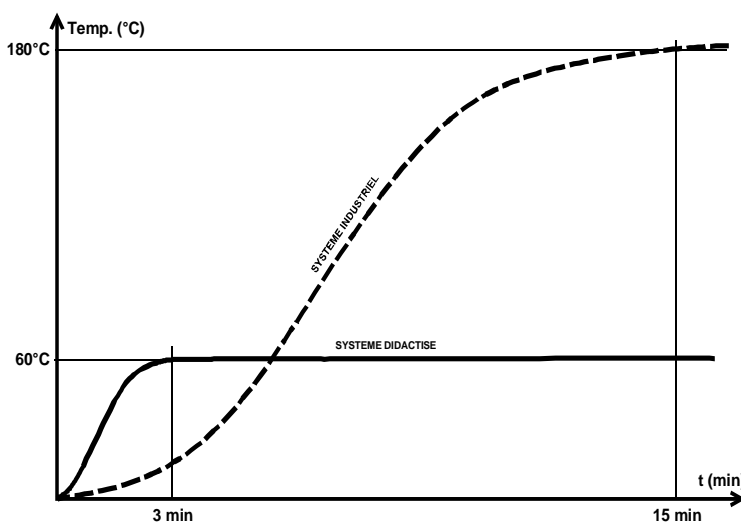


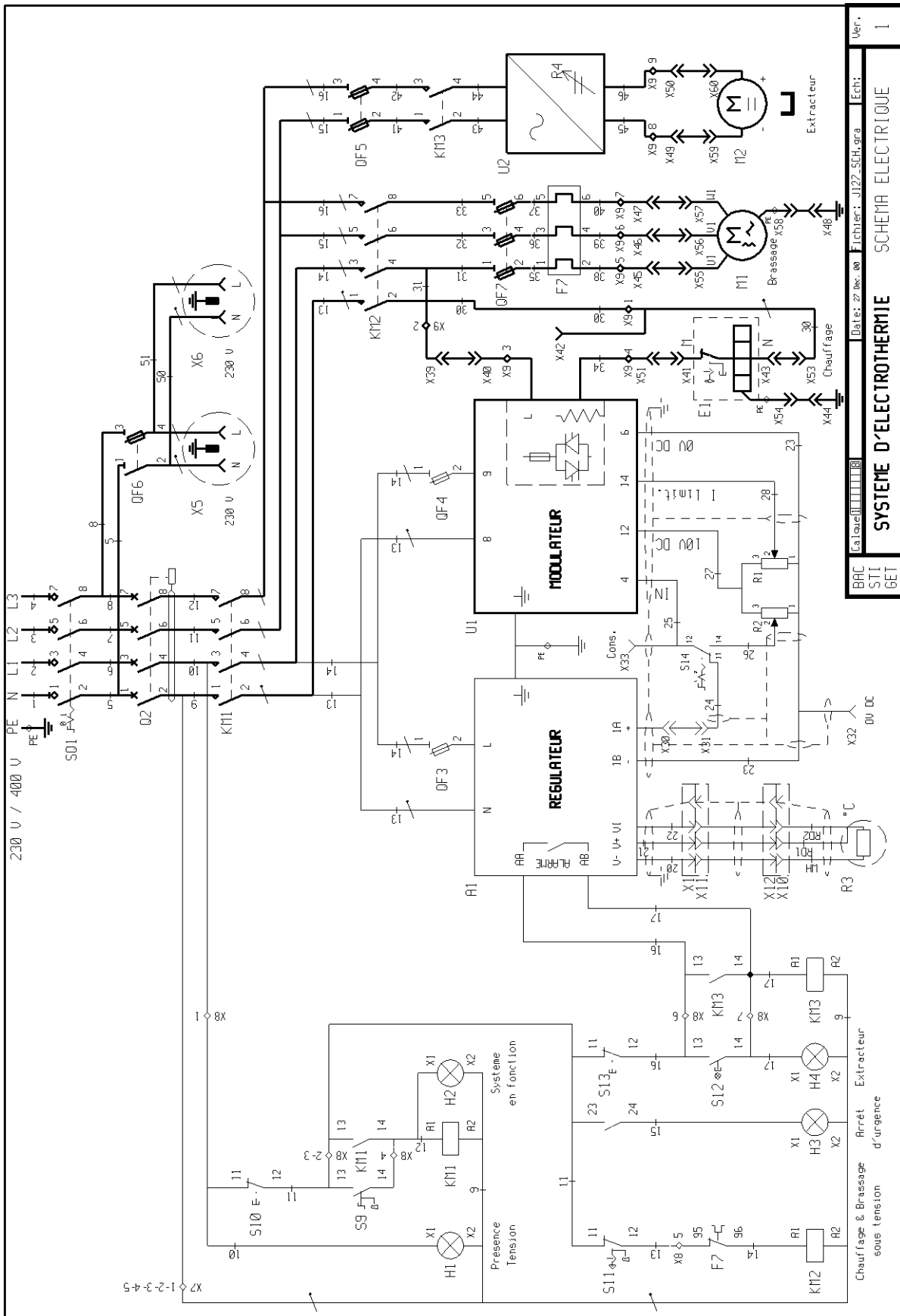
SCHÉMA 1

SYSTEME DIDACTISE 1,2 kW	SYSTEME INDUSTRIEL 6 kW
-----------------------------	----------------------------

Il existe une homothétie entre le Système didactisé et le Système industriel

Caractéristiques du four du système Didactisé :

- Température de fonctionnement : 60 °C
- Température maximale : 90 °C
- Temps de montée en température de 30 à 60 °C : 1 à 2 min.
- Temps de descente en température de 60 à 30 °C : 2 à 3 min.
- Puissance de chauffe : 1200 W
- Volume du tunnel de chauffe : 19 dm³
- Ventilateur de brassage avec MAS triphasé
- Ventilateur de perturbation avec MCC



BAC	La classe	Date: 27.06.00	Fichier: J127-SCH.gra	Ech:	Ver.
STI					1
6ET	SYSTEME D'ELECTROTHERMIE			SCHEMA ELECTRIQUE	

T.P. 1 : PROBLÉMATIQUE : MODULER L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE SUR CHARGE RÉSISTIVE.

Niveau : terminale STI GET.

Descriptif de l'activité :

- Mettre en œuvre l'appareil de commande.
- Configurer le modulateur.
- Mettre en évidence la dégradation du facteur de puissance et du taux d'harmoniques en fonction de la puissance.
- Mettre en évidence des surintensités aux bornes de la charge.

I - Introduction

Le convertisseur d'énergie est un four, charge résistive. Dans l'esprit de nos élèves, deux certitudes : le courant électrique qui le traverse est une image de la tension appliquée (dipôle linéaire), le facteur de puissance de l'installation est égal à 1, courant et tension sont parfaitement sinusoïdaux et en phase.

La modulation d'énergie remet en cause ces certitudes. Ce T.P. a pour objectif de déterminer un type de modulation qui permet d'éviter une dégradation précoce du système commandé et de maintenir une qualité d'installation (problème d'harmoniques) compatible avec les exigences du distributeur d'énergie.

II - Analyse fonctionnelle

L'architecture fonctionnelle est présentée figure 0, l'élève doit être capable d'y placer, au regard du système didactique d'électrothermie, les informations liant chaque fonction et les matériels associés à chaque fonction.

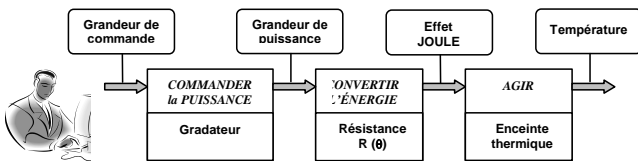


Figure 0 : Architecture fonctionnelle

III - Modulation par variation d'angle d'amorçage

L'élève met en place un wattmètre numérique permettant de mesurer le facteur de puissance et le taux d'harmoniques en amont du gradateur. Il configure le système en variation d'angle d'ouverture.

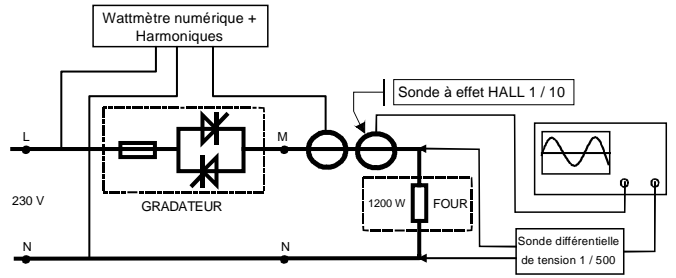


Figure 1 : Schéma de mesure

Il relève à l'oscilloscope l'angle α de retard à l'amorçage. L'allure du courant est de la forme ci-dessous.

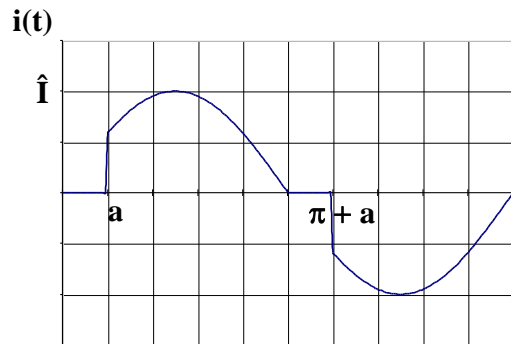


Figure 2 relevé de $i(t)$

La détermination théorique du facteur de puissance

($F_P = \frac{P_{totale}}{S_{totale}}$) en fonction de l'angle d'amorçage ou de

la puissance modulée n'est pas à notre portée lorsqu'il s'agit d'une forme d'onde non sinusoïdale telle que celle du courant électrique.

On peut cependant établir l'expression du facteur de déplacement, ($F_d = \cos(\varphi_1)$, φ_1 correspondant au déphasage entre la tension et le fondamental de i) en fonction de l'angle d'amorçage ou de P/P_{max} .

La tension appliquée est sinusoïdale : $u(t) = \hat{u} \times \sin(\omega t)$, le courant électrique $i(t)$ ne l'est pas (si $\alpha \neq 0$), il est cependant périodique et peut donc être développé en série de Fourier :

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$$

La puissance instantanée est donnée par : $p(t) = u \times i$

$$p(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \hat{u} \sin \omega t \times [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)]$$

soit $p(t) =$

$$\frac{1}{2} \hat{u} \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n+1)\omega t - a_n \sin(n-1)\omega t - b_n \cos(n+1)\omega t + b_n \cos(n-1)\omega t]$$

Cette puissance instantanée, $p(t)$, est une somme de grandeurs sinusoïdales dont la valeur moyenne est nulle, à l'exception du terme constant $\frac{1}{2} \hat{u} b_1$

La puissance active correspond à la valeur moyenne de $p(t)$: $P = \langle p \rangle = \langle u \cdot i \rangle = \frac{1}{2} \hat{u} \hat{i} \cos(\varphi_1)$

Seul le fondamental contribue à la puissance active

$$P = U \times I_1 \times \cos(\varphi_1) = \frac{1}{2} \hat{u} \hat{i} \cos(\varphi_1)$$

$$i_1(t) = a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \sin(\omega t - \varphi_1)$$

$$i_1(t) = \hat{i} \sin(\omega t - \varphi_1)$$

avec : $a_1 = \frac{\hat{i}}{2\pi} [\cos(2a) - 1]$

$$b_1 = \frac{\hat{i}}{2\pi} [2\pi - 2a + \sin(2a)]$$

L'expression de la puissance active absorbée par la charge sera donc fonction de a :

$$P = \frac{\hat{u} \times \hat{i}}{4\pi} (2\pi - 2a + \sin(2a)) = \frac{P_{MAX}}{2\pi} (2\pi - 2a + \sin(2a))$$

soit $\frac{P}{P_{MAX}} = \frac{(2\pi - 2a + \sin(2a))}{2\pi}$

d'autre part, $F_d = \cos(\varphi_1) = \frac{P}{U \times I_1}$

Les évolutions du F_p et du F_d en fonction de la puissance modulée sont représentées figure 3

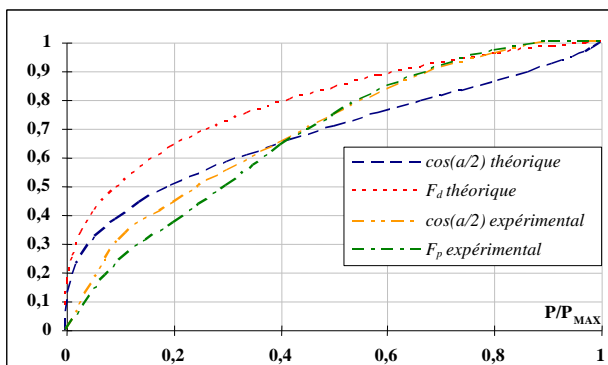


Figure 3 : Cosinus de l'angle de retard à l'amorçage (a) et facteur de puissance (F_p)

Elles font apparaître une dégradation du facteur de puissance en fonction de l'angle de retard à l'amorçage a .

Une autre caractéristique importante concerne la « pollution électrique » créée par certains modes de modulation d'énergie.

Le taux global de distorsion « THD » (Total Harmonic Distortion) met en évidence l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques.

$$THD\% = 100 \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}{Y_1^2}}$$

Y_1 = valeur efficace du fondamental

Y_n = valeur efficace de l'harmonique n

Ce taux correspond au rapport de la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques à partir de 2 par rapport au fondamental.

Cette distorsion est révélée par la différence entre le facteur de puissance et le facteur de déplacement. En l'absence de distorsion, cette différence est nulle (figure 3 pour $P/P_{MAX} > 0,8$).

L'évolution du taux d'harmoniques en fonction de la puissance modulée est représentée figure 4.

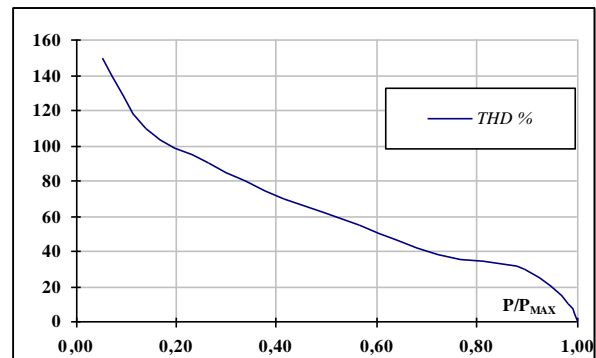


Figure 4 : Taux d'harmoniques (THD%) en fonction de P/P_{MAX}

Il fait apparaître un taux d'harmonique d'autant plus important que la puissance modulée est faible.

Ce type de commande est générateur de pollution harmonique dont les effets néfastes sont bien connus (échauffement supplémentaire, compatibilité électromagnétique).

La modulation par variation d'angle d'ouverture dégrade le facteur de puissance même sur charge résistive et génère une pollution harmonique. Ces effets secondaires ne sont pas toujours acceptables, il convient donc de rechercher un autre type de modulation d'énergie.

IV - Modulation par train d'ondes

L'élève choisit et place ensuite les différents appareils de mesure permettant de visualiser les allures de la tension et de l'intensité dans la charge résistive.

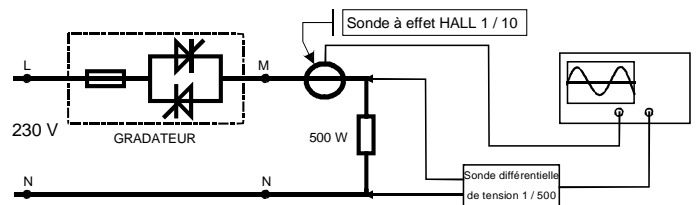


Figure 5 : Schéma de mesure

La modulation est réglée sur « Train d'ondes ». Les deux grandeurs relevées ci-dessous (figure 6) permettent la mise en évidence d'une surintensité en début du train d'ondes.

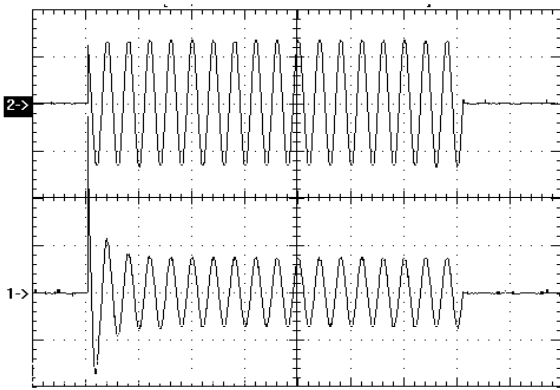


Figure 6 : Train d'ondes sur charge résistive

L'analyse de la réponse en courant de la charge permet de mettre en évidence l'influence du coefficient de température des résistances du dispositif qui se traduit par une surintensité d'environ 460 % au début du train d'ondes (voie 1).

Tension et courant sont en phase et sinusoidaux, le facteur de puissance n'est pas dégradé.

Compte tenu de la surintensité observée, une nouvelle configuration en mode de commande des thyristors « Train d'ondes avec démarrage progressif » est alors choisie.

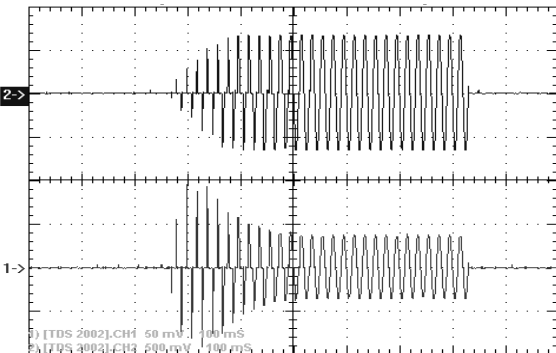


Figure 7 : Démarrage progressif sur charge résistive.

La surintensité (voie 1) d'environ 230 % est nettement diminuée, de l'ordre de 50 % (voie 1) grâce à l'augmentation progressive de la tension au début du train d'ondes (voie 2). Ce type de modulation d'énergie est le meilleur compromis pour des charges résistives.

T.P. 2 : PROBLÉMATIQUE : OBTENIR UNE TEMPÉRATURE CONSTANTE QUELLE QUE SOIT LA PERTURBATION.

Niveau : terminale STI GET.

Descriptif de l'activité :

- Désigner les relations qui permettent les rétroactions.
- Régler le gain de la chaîne d'action et ajuster les correcteurs associés, à l'aide de mesures ou

d'observations, afin d'obtenir le comportement attendu du système.

- Identifier les contraintes de stabilité.

En présence du système didactisé d'électrothermie et à partir des constituants suivants (fig. 8), l'élève est capable d'associer les matériels associés à chaque fonction et de placer les informations liant chaque fonction.

On introduit également les termes industriels de X (mesure), Y (grandeur de commande), W (consigne de température) et les notions de chaîne d'action et de chaîne de réaction.

L'objectif de cette régulation est de maintenir une température constante. Pour différentes types de correction, nous allons étudier la réponse du système à une perturbation.

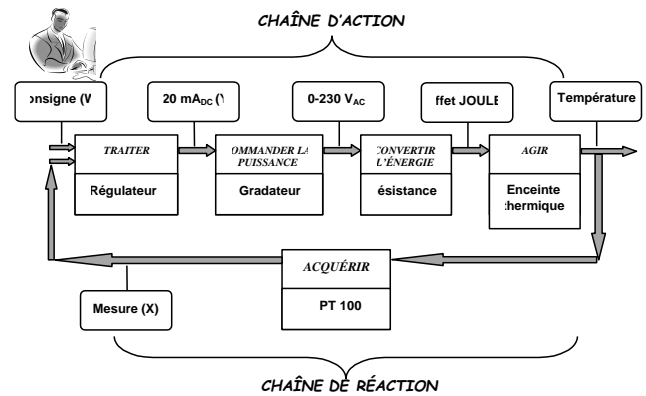


Figure 8 : Chaînes d'action et de réaction du système

PREMIÈRE PARTIE : ACTION PROPORTIONNELLE

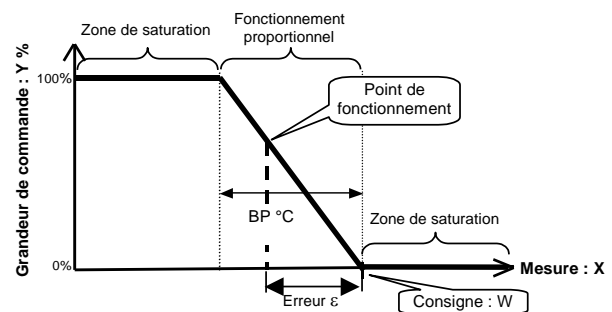


Figure 9 : Variation de la grandeur de commande en fonction de la mesure en mode proportionnel

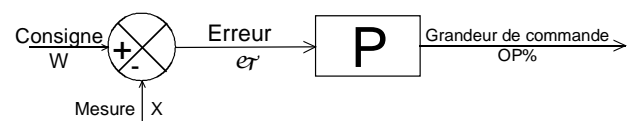


Figure 10 : Structure d'un régulateur à action proportionnelle

Le système a une consigne de 45°C, et à un moment donné une perturbation constante est appliquée (voir Fig. : 11 et 12). Les relevés suivants illustrent qualitativement l'influence de l'action proportionnelle sur la précision de la régulation.

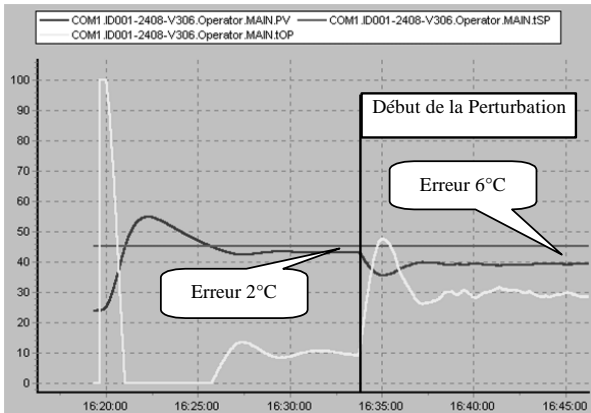


Figure 11 : Influence de l'action proportionnelle avec une BP = 20°C.

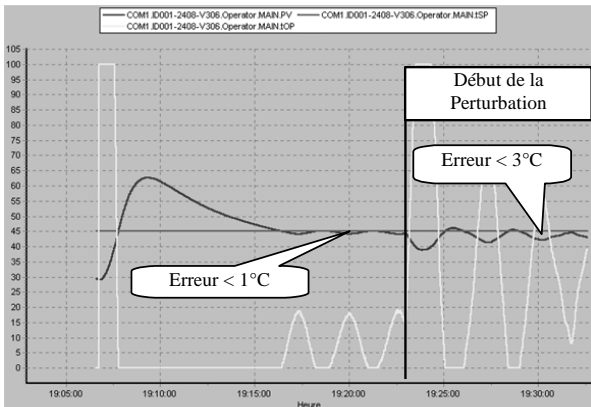


Figure 12 : Influence de l'action proportionnelle avec une BP = 5°C.

En régime établi on note une erreur de 2°C, la perturbation intervient, après un régime transitoire relativement court, le régime permanent se rétablit mais avec une erreur de 6°C. La diminution de la bande proportionnelle peut réduire cette erreur mais au détriment de la stabilité : début d'oscillations. Les limites de la seule correction proportionnelle apparaissent clairement. L'élève vérifie expérimentalement le fameux dilemme : « STABILITÉ – PRÉCISION ».

DEUXIEME PARTIE :

ACTION PROPORTIONNELLE ET INTEGRALE

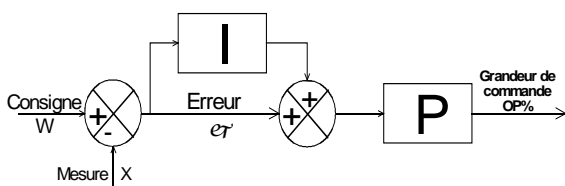


Figure 13 : Structure MIXTE (la plus répandue industriellement)

Le relevé suivant illustre qualitativement l'influence des actions proportionnelle et intégrale sur la précision de la régulation ainsi que sur la stabilité.

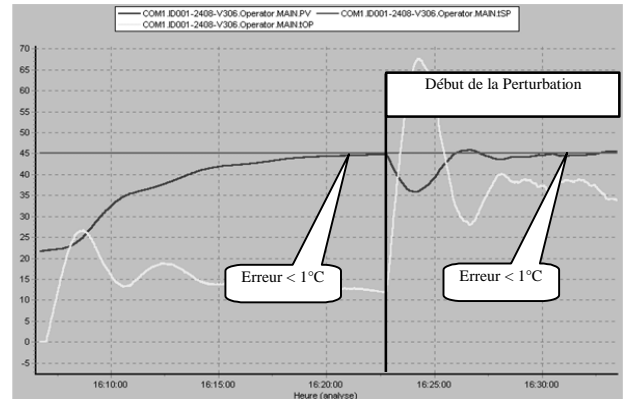
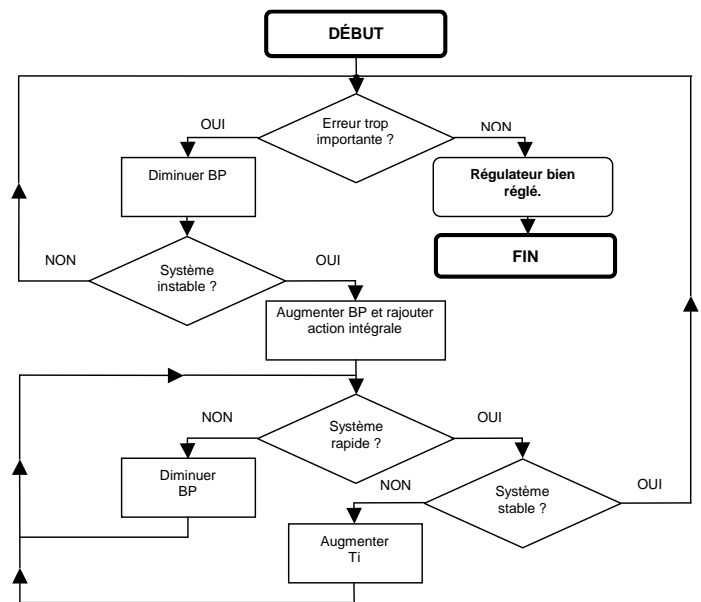


Figure 14 : Influence des actions proportionnelles et intégrales avec une BP = 20°C et Ti = 4 min

On note une erreur inférieure à 1°C en régime établi. Lorsque la perturbation intervient, la température diminue et la réaction du correcteur est immédiate. Le régime transitoire est plus court que le précédent. L'action proportionnelle et intégrale permet une réponse plus rapide et plus stable tout en maintenant une très bonne précision. La rapidité est apportée par l'action proportionnelle, l'action intégrale améliore la précision.

FICHE TECHNIQUE POUR LE RÉGLAGE DES ACTIONS P ET I



DOSSIER RESSOURCES : Production d'énergie électrique en Corse : Les micro centrales

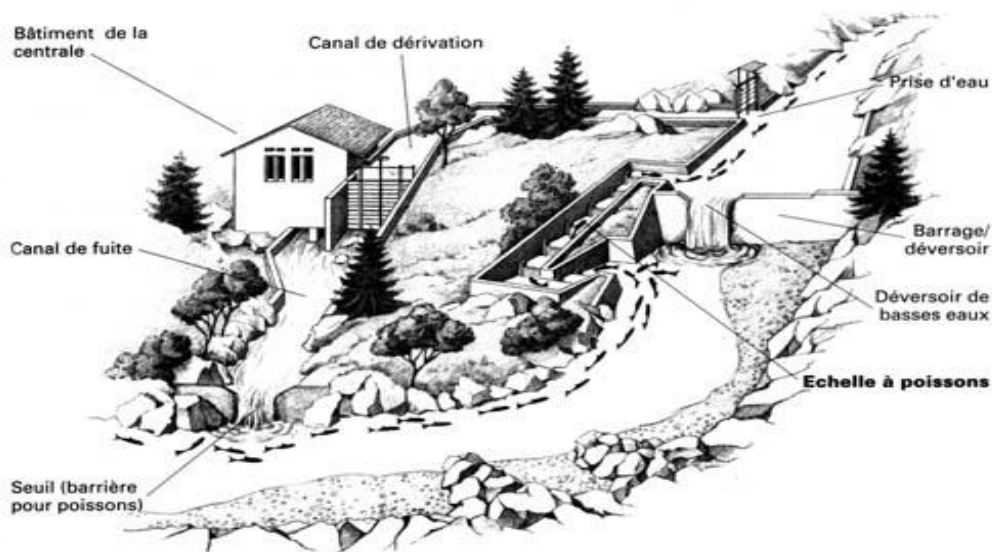
René AMORETTI

Professeur agrégé de génie électrique

Lycée Vincensini, Bastia

Résumé : exemple de dossier ressource présentant une partie de programme de génie électrique, s'appuyant sur des exemples locaux.

1 Présentation d'une centrale



Vue d'une micro centrale

2 Principe de fonctionnement

Une source d'énergie hydraulique, définie par un débit et une hauteur de chute, est convertie successivement en énergie mécanique (turbine) puis en énergie électrique par entraînement d'une génératrice débitant sur le réseau électrique.

La tension de la machine électrique en général basse tension est mise en forme pour être connectée le plus souvent sur les réseaux MT 20 kV.

Le réseau électrique impose la tension et la fréquence au générateur. Pour se faire la condition est que l'impédance du réseau soit négligeable devant l'impédance de sortie du générateur (réseau puissant).

3. Détermination de la puissance électrique

Puissance hydraulique fournie à la turbine (kW) :

- $P = 10 \times H \times Q$ (H en m, et Q en m³/sec)
- Rendement moyen de la turbine > 0,85
- Rendement moyen du générateur > 0,9
- Puissance électrique moyenne (kW) :
> $7,5 \times H \times Q$

4. Les microcentrales en Corse

Les microcentrales hydroélectriques constituent en Corse une part prépondérante des énergies renouvelables. La puissance moyenne installée par site se situe autour de 1,5 MW.

À titre d'exemple on peut citer :

- CARGIACCA	4,0 MW
- CASAMOZZA	2,4 MW
- GIUCAGGIO	2,0 MW
- ALESANI	1,6 MW
- ASCO 1	1,6 MW
- PONTE LECCIA	1,6 MW
- ASCO 2	1,0 MW
- CASAMOZZA 2	0,8 MW
- SOCCIA	0,8 MW
- ASINAO	0,65 MW
- ASCO 3	0,6 MW

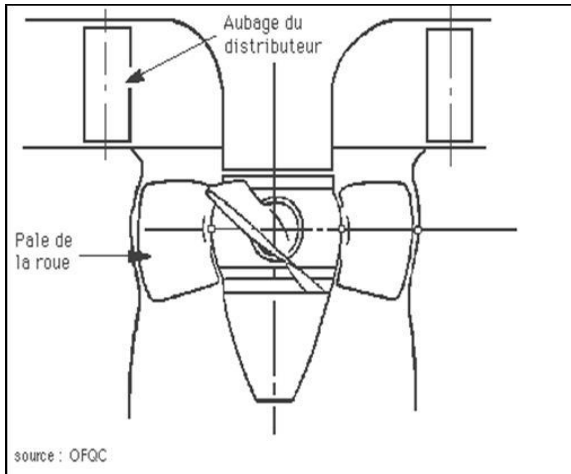
5. Les turbines

Trois types de turbines sont utilisés en fonction de la hauteur de chute disponible.

5.1. Les turbines KAPLAN

- Faibles chutes, moins de 10 mètres
- Débits importants 300 à 10 000 l/sec
- Éléments de réglages : distributeurs et pales

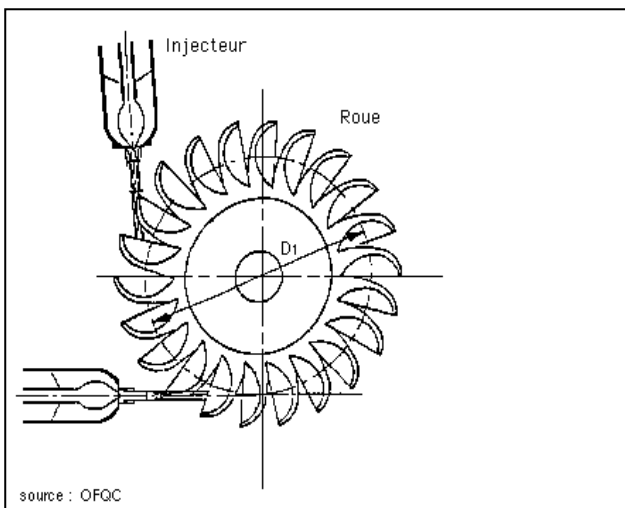
Les positions des pales et du distributeur sont liées par une courbe de conjugaison fournie par le constructeur pour optimiser le rendement



Turbine de type Kaplan

5.2. Les turbines FRANCIS

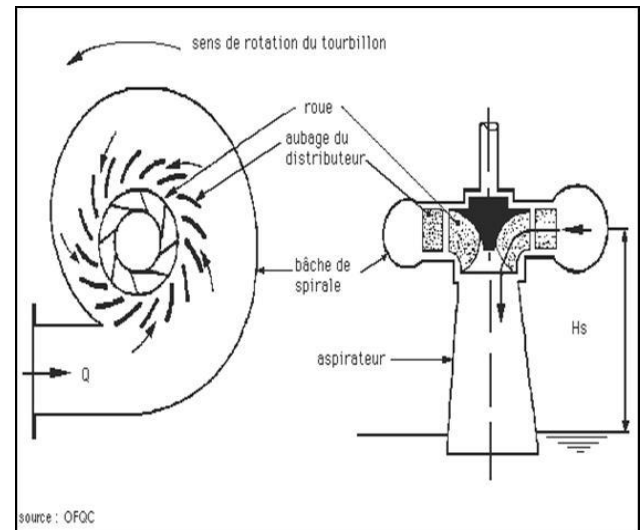
- Moyennes chutes (10 à 100 mètres) ;
- Débits moyens (100 à 6 000 l/sec) ;
- Éléments de réglage : distributeurs à directrices orientables (roues à pales fixes).



Turbine de type Francis

5.3. Les turbines PELTON

- Hautes chutes (10 à 500 mètres)
- Faibles débits (20 à 1 000 l/sec)
- Éléments de réglages : injecteurs de débit réglables.



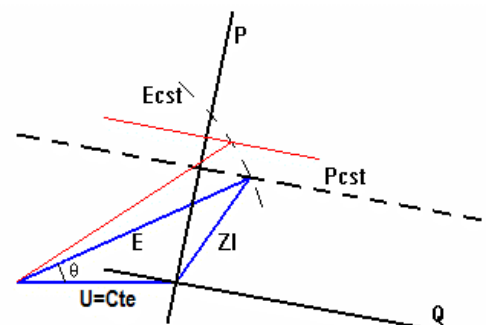
Turbine de type Pelton

6. Les générateurs électriques

On utilise soit des machines synchrones soit des machines asynchrones. La fréquence et la tension sont imposées par le réseau (cas des réseaux puissants).

6.1. Génératrice synchrone

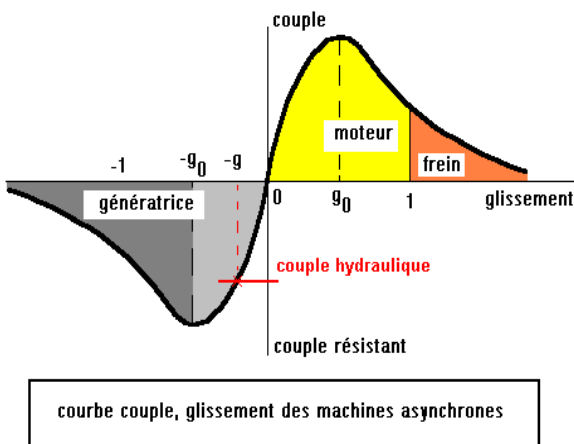
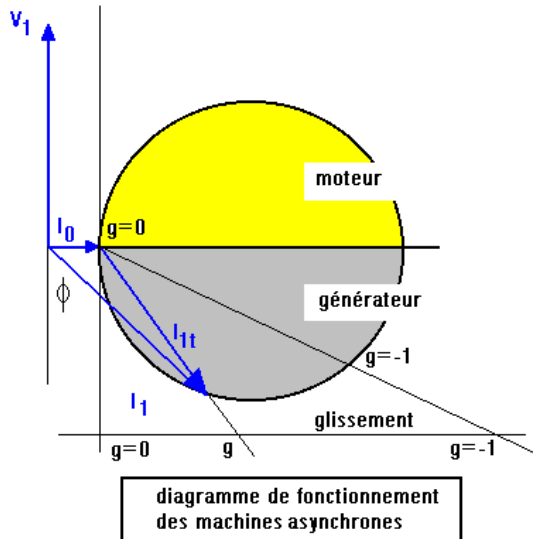
- Système de réglage (tension fréquence) assez complexe au couplage
- Pas de batteries de condensateurs (réglage du cos Φ par le courant d'excitation)
- Bon rendement
- Coût plus élevé qu'une machine asynchrone



alternateur couplé à un réseau puissant
(U et f imposés par le réseau)

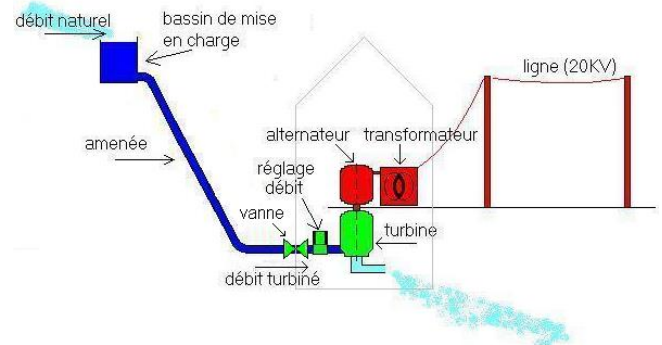
6.2. Génératrice asynchrone

- Système de couplage au réseau (tension fréquence) simple
- Robuste
- Coût inférieur aux alternateurs
- Rendement inférieur aux alternateurs
- Nécessité d'utiliser des batteries de condensateurs pour le réglage du cos Φ



7. Principe de la commande

Les problèmes de régulation se posent lorsque le débit turbinable devient supérieur au débit naturel.



7.1. Identification du système

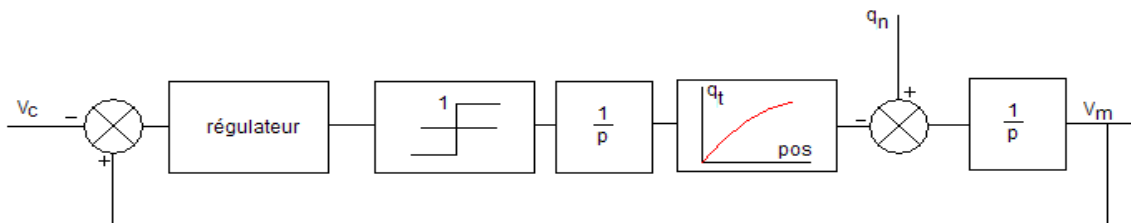
Le principe de la régulation consiste à maintenir le volume constant dans le bassin de mise en charge.

On appelle :

- $q_t(t)$: le débit turbiné
- $pos(t)$: la position de l'organe de réglage du débit turbiné (distributeur ou injecteur selon le type de turbine)
- $o_f(t)$: la commande d'ouverture /fermeture de l'organe de réglage du débit turbiné
- $q_n(t)$: le débit naturel

Les éléments du processus sont essentiellement les suivants :

- l'organe de réglage du débit (distributeur ou injecteur) est généralement piloté en tout ou rien (ouvre/ferme). Il s'agit d'une commande en vitesse.
 - La relation $POS(p) / O_F(p)$ est donc un intégrateur pur $1/p$
 - La relation $Q_t(p) / POS(p)$ est un gain G_q qui varie en fonction de la position $pos(t)$ selon une courbe fournie par le constructeur de la turbine
- le bassin de mise en charge qui est un intégrateur pur $V_m(p) / (Q_t(p) - Q_n(p)) = 1/p$.



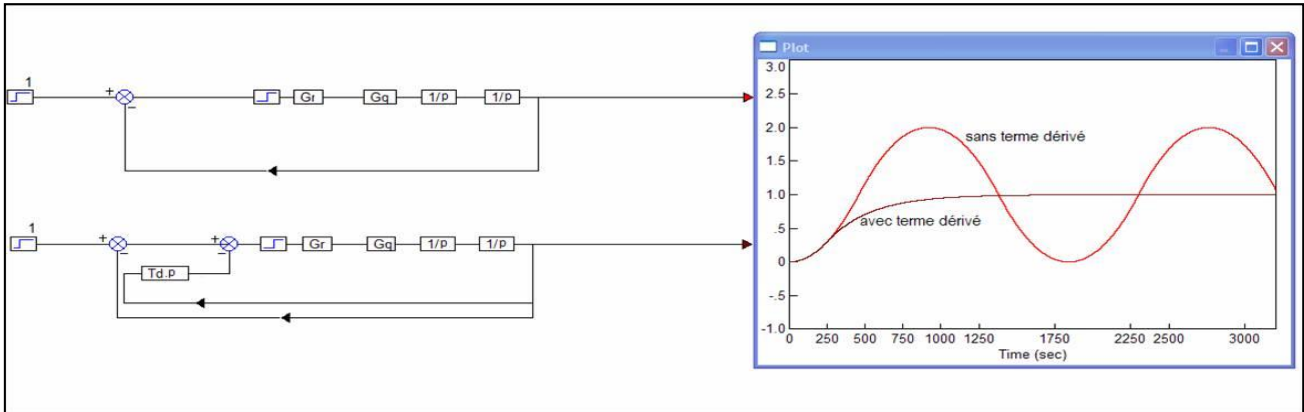
modèle du système

7.2. Régulateur.

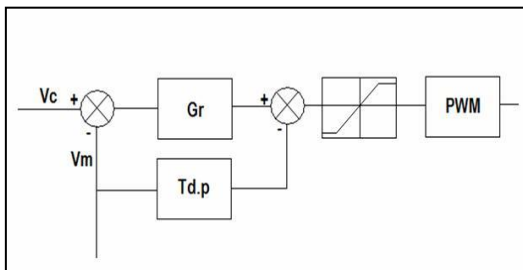
Le système étant le siège d'une double intégration est oscillant par nature. Le correcteur sera du type proportionnel et dérivé.

Le terme proportionnel G_r est déterminé pour avoir des oscillations de période T_0 compatibles avec les exigences du fournisseur d'énergie. T_0 est de l'ordre de 1800 secondes.

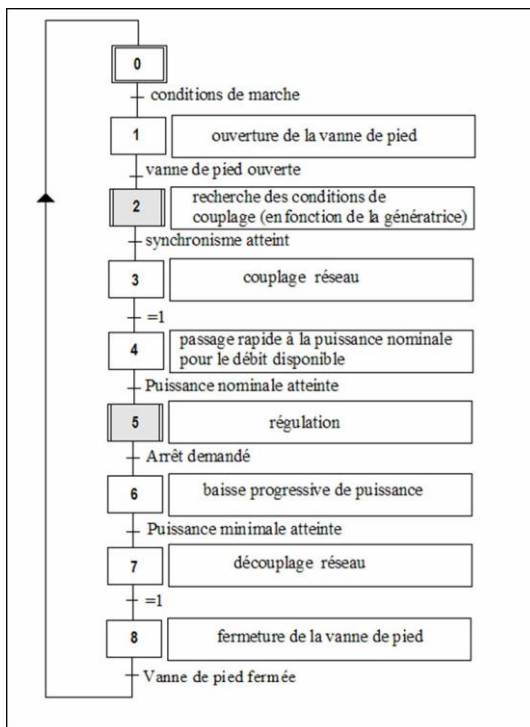
Le terme dérivé T_d pourra alors prendre la valeur $T_0 / 2 \times \pi$



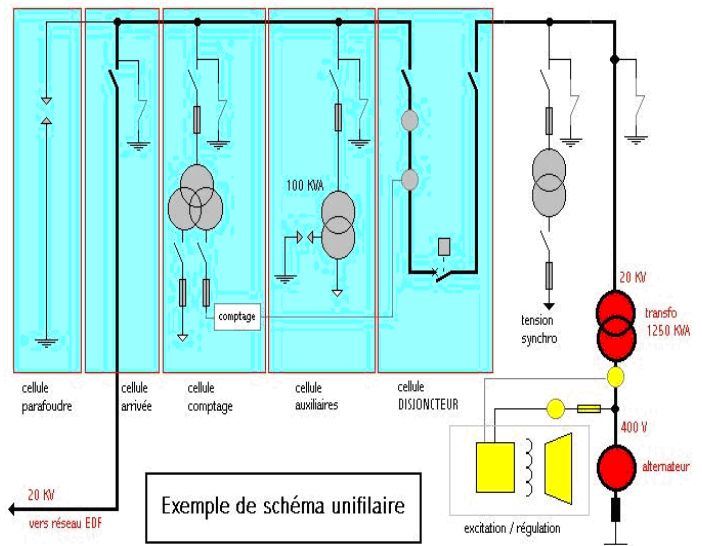
7.3. Régulateur pratique



7.4. Grafset de fonctionnement type



8. Schéma de puissance type (cas d'une machine synchrone)



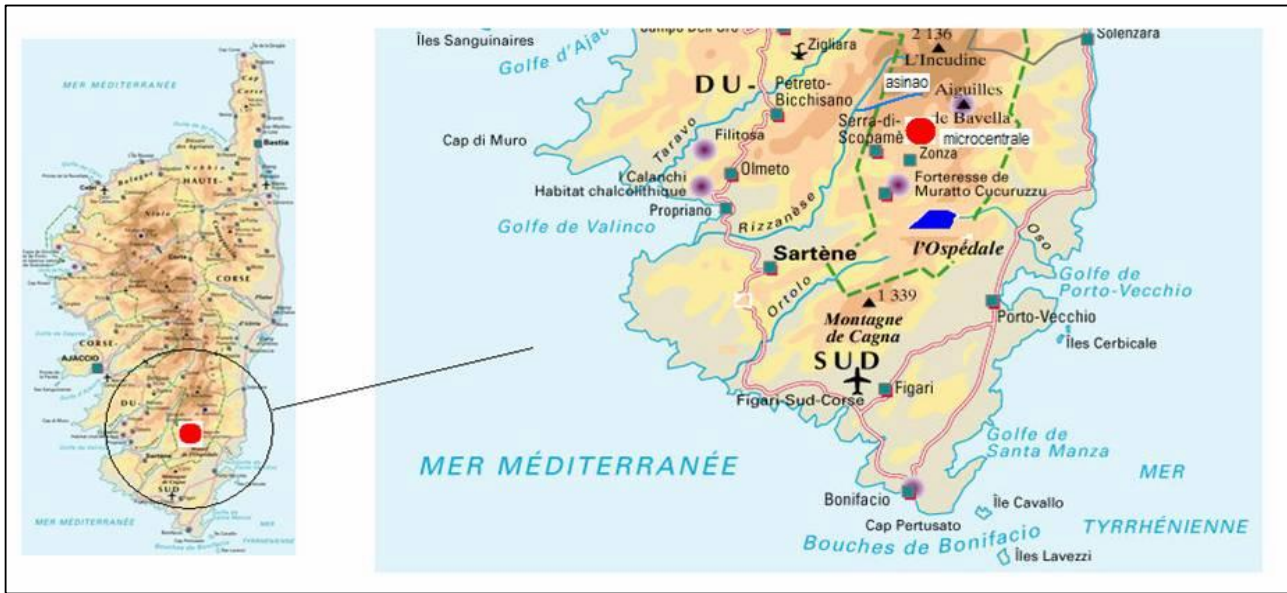
9. exemple : microcentrale de l'ASINAO

9.1. Situation

La microcentrale de l'ASINAO est située dans le sud-est de la Corse au voisinage du massif de l'OSPEDALE près de la commune de ZONZA.

Elle est alimentée par une prise sur la rivière ASINAO affluent du RIZZANESE. Cette prise située altimétriquement à la cote 1077 m NGF, alimente une conduite de diamètre 400 mm, destinée à soutenir l'étiage de la rivière OSO pendant la période sèche et à remplir le barrage de l'OSPEDALE pendant la période humide.

Sur le parcours de la conduite, à 6 km environ à l'aval de la prise à la cote 752, un piquage permet de dévier les eaux vers la microcentrale.



9.2. Caractéristiques hydrauliques

- Débit équipé : 300 l/s
- Cote de mise en charge : 1076 m NGF
- Cote moyenne des injecteurs : 751 m NGF
- Chute brute : 326 m
- Perte de charges : 64 m
- Hauteur de chute nette : 262 m
- Cote plancher usine : 750 m NGF

9.3. Turbine :

- Type : PELTON horizontale à 2 jets
- Chute nette : 262 m
- Débit : 2 fois 150 l/s
- Puissance : 671 kW
- Vitesse : 1000 tr/min
- Vitesse d'emballement : 1950 tr/min
- Système de manœuvre :

- pour chacune des aiguilles des injecteurs, ouverture par vérin à simple effet et fermeture par ressort
- 4 contacts de position
- un déflecteur avec un vérin unique à simple effet et contrepoids de manœuvre.

Roue à auget poli en cupro aluminium claveté sur l'arbre moteur, arbre moteur en acier inox XC38, bâti en acier soudé avec caisson support de palier, étanchéité par joint labyrinthe, capote en acier, 2 paliers de roulement, graissage à huile, un accouplement élastique entre turbine et génératrice.

Rendements :

Débit l/s	300	250	200	150	100	60	50
Rendement %	88	89	89	89	87	83	81
Puissance kW	676	611	513	398	270	157	128

9.4. Génératrice (asynchrone)

- Vitesse de rotation : 1000 tr/min
- Emballement : 1950 tr/min pendant 5 min
- Puissance maximale : 741 kW
- Tension : 380 V
- Courant : 1263 A
- Cos φ : 0,89
- Fréquence : 50 Hz
- Paliers à roulements
- 2 sondes de température dans les paliers type à résistance
- Bobinage : classe F, sonde ipsotherme à ouverture dans le bobinage

Caractéristique en charge	4/4	3/4	1/2	1/4
Rendement %	96	96	95	94
Cos φ	0,89	0,88	0,85	0,70

9.5. Transformateur

Étoile triangle type XTHA avec neutre isolé 800 kVA 15-20 kV / 400-230 V, isolement 50 kV, Ucc = 4,5%

9.6. Batteries de condensateurs :

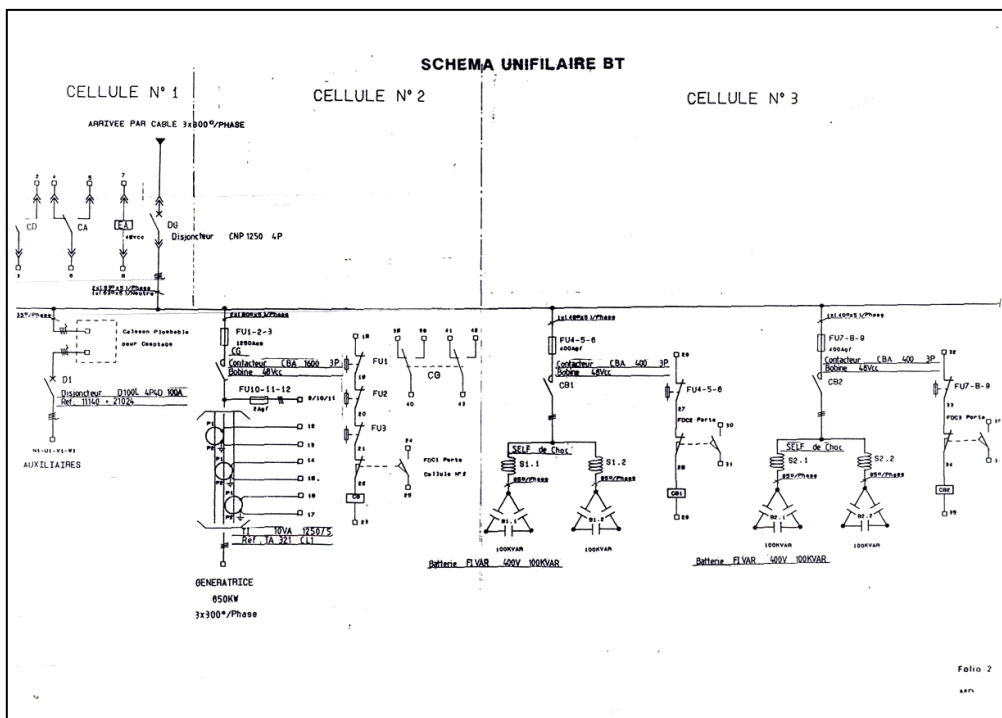
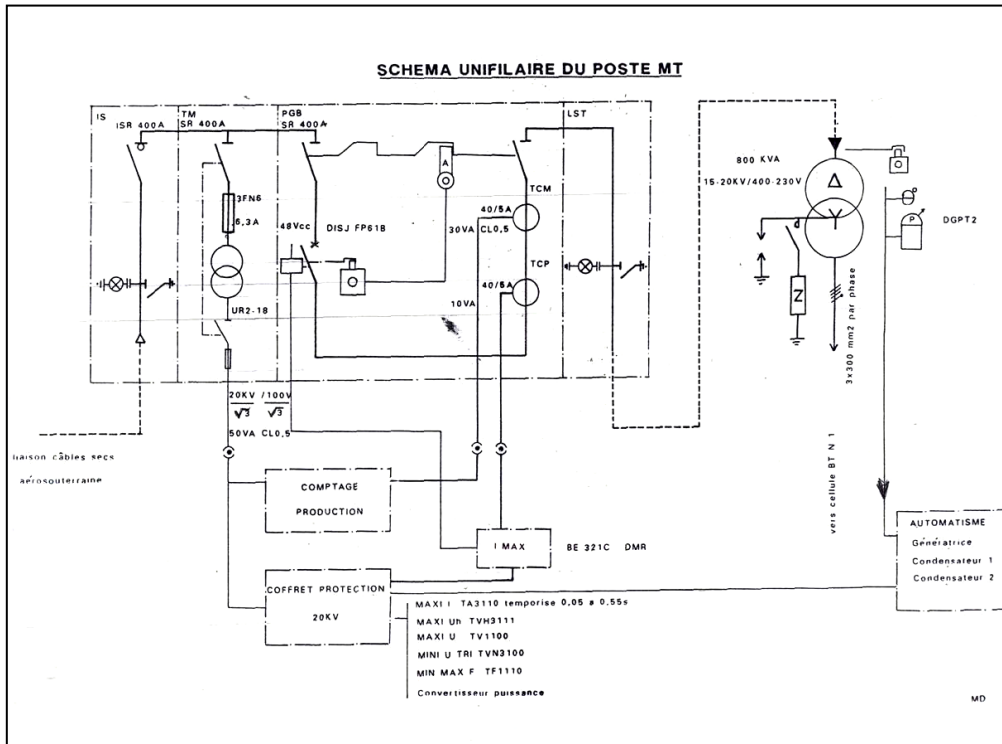
4 fois 100 kVar.

9.7. Partie commande

- **Automate programmable APRIL PB200** avec :
 - 64 entrées TOR
 - 64 sorties TOR
 - 4 entrées analogiques
 - Éléments gérés par l'automate
 - le pupitre électromécanique (l'ensemble des commutateurs et voyants de signalisation)

- l'amenée
- la turbine
- le couplage au réseau électrique
- les condensateurs
- les alarmes
- la centrale à huile
- les réglages

- **Terminal de télésurveillance SOFREL S15 SX**

9.8. Schémas unifilaires


BULLETIN D'ABONNEMENT A LA REVUE 3EI

Année 2009 – 2010

N°59 (décembre 2009), n°60 (mars2010), n°61 (juin 2010), et 62 (septembre 2010).

Abonnement individuel :

Adresser le bulletin ci dessous, accompagné d'un chèque libellé à l'ordre de :

SEE- la revue 3EI

à l'adresse suivante

SEE-la revue 3EI

17 rue Hamelin , 75783 PARIS CEDEX 16

D'un montant de : 36 € TTC pour la France et pays de la CEE

Ou de : 46 € TTC pour les pays hors CEE

Nom :.....Prénom

Adresse d'expédition de la revue 3EI :

Rue, n° :.....

Code postal :..... Ville :.....

Pays :.....

Adresse électronique :.....

Activité (pour statistiques) :.....

Abonnement souscrit pour une collectivité (bibliothèque , CDI, laboratoire, entreprises, université, école d'ingénieur, lycée, IUT ...)

52 € TTC pour la France et pays de la CEE

65 € TTC pour les pays hors CEE

Prendre soin de mentionner sur le bon de commande le lieu de livraison de la revue ainsi que le destinataire (personne physique ou service). Expédier le bon de commande à

SEE-la revue 3EI

17 rue Hamelin , 75783 PARIS CEDEX 16

