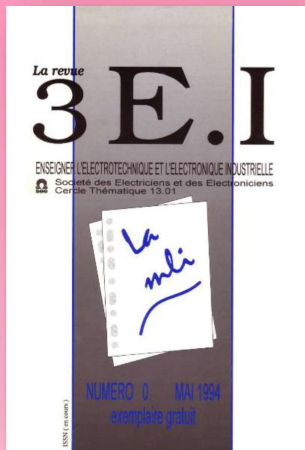
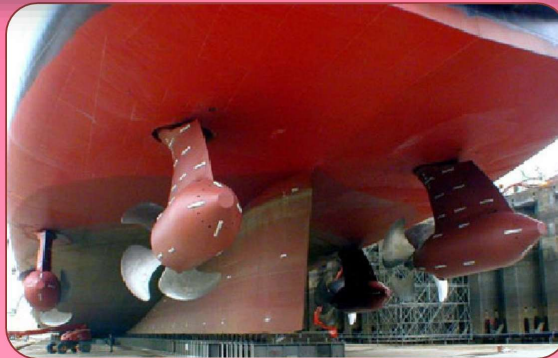


La Revue 3E.I



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



*Exemples
de
tractions
électriques*

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



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

VISITEZ LE SITE de LA REVUE 3EI sur <https://www.see.asso.fr/3ei>

3EI



- Bienvenue
- Abonnement et formulaires
- Organisation
- N° (papier)
- N° (en ligne)
- Articles / Auteurs
- Journées 3EI
- Soumettre un article
- Manifestations



La Revue 3EI est un OUTIL DE COMMUNICATION du Cercle SI-01 (1) de la SEE.
 La Revue 3EI est destinée aux professeurs ou industriels concernés par l'enseignement de l'électrotechnique et de l'électronique industrielle.
 Les articles ont reçu l'agrément du Comité de Publication constitué d'enseignants, de chercheurs et d'industriels.

La Revue 3EI est une source de documentation précieuse dans le cadre de la formation continue des ingénieurs du domaine et permet:

- de diffuser des articles à caractères scientifique, technologique, pédagogique et historique (Histoire des Sciences) ;
- d'informer ses lecteurs sur la tenue de manifestations en rapport avec l'électrotechnique et l'électronique industrielle : conférences, journées d'études, salons, etc ;
- de faire de la publicité pour les matériels industriels ou pédagogiques en rapport avec l'enseignement de l'électrotechnique et de l'électronique industrielle.

Pour vous donner envie de vous abonner, nous avons mis en ligne quelques articles en accès public. Ne vous privez pas du plaisir de les lire!

Commission Paritaire 1217 G 78028. ISSN 1252-770X

(1) Cercle thématique SI-01: relation enseignement- industrie-recherche dans le domaine de l'Enseignement de l'Electrotechnique et de l'Electronique Industrielle ("3EI").

- Bienvenue
- Abonnement et formulaires
- Organisation
- N° (papier)
- N° (en ligne)
- Articles / Auteurs
- Journées 3EI
- Soumettre un article
- Manifestations

Pour vous abonner en ligne, sélectionner la formule de votre choix. Vous pourrez régler par carte de crédit, chèque ou virement : suivez les instructions applicables au mode de règlement choisi.

Les membres SEE bénéficient de réductions, les prix affichés tiennent compte de votre situation lorsque vous êtes connecté.

Ceux qui n'ont pas la possibilité de souscrire en ligne peuvent utiliser le formulaire manuel. En cas de difficultés, appelez au 01 56 90 37 17

Abonnement 3EI 2016 spécial adhérents spécial

Qualité souscripteur : *

- Individuel, 36,00 €
- Collectif, 51,00 €

se connecter ou s'enregistrer pour commander.

Abonnement 3EI 2016

Abonnement papier, les membres SEE bénéficient d'une réduction. **Adhézé à la SEE** à cette page

- Si vous êtes déjà membre et souscrivez l'abonnement avant le 1er janvier, pensez à renouveler en même temps votre adhésion pour bénéficier de plein droit de la réduction offerte.
- Un supplément est applicable aux abonnés hors Union Européenne.

- Individuel, 40,00 €
- Collectif, 57,00 €

se connecter ou s'enregistrer pour commander.

Accès en ligne 3EI Abonné Abonné

Accès en ligne à la 3EI réservé aux membres de la SEE bénéficient d'une réduction. **Adhézé à la SEE** à cette page.

Vous ne pouvez souscrire à cet accès que si vous êtes abonné 3EI.

- Individuel, 6,00 €
- Collectif, 10,00 €

se connecter ou s'enregistrer pour commander.

Accès en ligne 3EI 2016 Abonné, Spécial adhérents Abonné, Spécial

Vous devez également vous abonner à la 3EI pour bénéficier de cet accès.

Qualité souscripteur : *

- Individuel, 5,00 €
- Collectif, 10,00 €

se connecter ou s'enregistrer pour commander.

Accès en ligne 3EI 1 an 1 an

Vous pouvez souscrire à l'abonnement électronique seul. Les membres SEE bénéficient d'une réduction. **Adhézé à la SEE** à cette page

30,00 €

se connecter ou s'enregistrer pour commander.

3EI Abonnement 2016 Formulaire manuel



3EI Commande ancien numéros Formulaire manuel



3EI Commande DVD archives Formulaire manuel





LaRevue 3EI
publication trimestrielle
de la SEE

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

17, rue de l'Amiral Hamelin, PARIS 75783 CEDEX 16
Tél : 01 56 90 37 09 Fax : 01 56 90 37 19
site web : www.see.asso.fr

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

3EI : Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

<p>La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 PARIS Cedex 16</p> <p>Directeur de la publication François GERIN Président de la SEE</p> <p>Rédacteur en Chef Franck LE GALL</p> <p>Adresser les propositions d'article à : revue3ei@gmail.com ou sur le site https://www.see.asso.fr/3ei_rubrique "soumettre un article"</p> <p>Communication Mr Jacques HORVILLEUR communication@see.asso.fr 01 56 90 37 09</p> <p>Promotion et Abonnements (4 numéros par an) Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2016. Aurélié BAZOT – Tél : 01 56 90 37 abo@see.asso.fr</p> <p>tarifs TTC : (revue papier)</p> <p><u>Individuel :</u> France et UE 40 € Pays hors UE 50 €</p> <p><u>Collectivités :</u> France et UE 57 € Pays hors UE 70 €</p> <p><u>Au numéro :</u> France et UE 12 €</p> <p>Impression JOUVE 53100 Mayenne 11 bd de Sébastopol 75027 Paris Cédex 1 Tel : 01 44 76 54 40</p> <p>Dépôt Légal : Octobre 2016 Commission Paritaire 1217 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n° 86</p> <p style="text-align: center;">Thème : Exemples de tractions électriques</p> <p>p. 2 Éditorial,</p> <p>p. 3 Abonnements</p> <p>p. 4 Les convertisseurs pour les propulsions marines J. COURAULT</p> <p>p. 25 Différentes Stratégies de pilotages pour Véhicule Electrique Optimisation : puissance moteur, énergie véhicule, temps... A. SIVERT¹, F. BETIN¹, B. VACOSSIN¹, J. AUBRY², T. LEQUEU³ ¹ Laboratoire des Technologies innovantes (L.T.I), IUT de l'Aisne GEII, SOISSONS ² ESTACA'LAB, « Systèmes et énergie embarqués pour les transports », LAVAL ³ Association e-Kart, Université TOURS TOURS</p> <p>p. 34 Réalisation d'un kart électrique : des solutions pour faire évoluer le projet T. LEQUEU¹, V. DEWANCKER², S. JACQUES³, A. SIVERT⁴ ¹ Université François Rabelais de Tours ² Société Kart Masters SABLE SUR SARTHE ³ Université François Rabelais de Tours – Polytech Tours TOURS ⁴ U.P.J.V. Université de Picardie Jules Verne – IUT de l'Aisne GEII SOISSONS</p> <p style="text-align: right;">Hors Thème :</p> <p>p. 44 Batteries de Smartphone (Application, diagnostic) A. SIVERT¹, B. VACOSSIN¹, F. BETIN¹, N. DAMAY² ¹ U.P.J.V. Université de Picardie Jules Verne – IUT de l'Aisne GEII SOISSONS ² Sorbonne universités, Université de technologie de Compiègne COMPIEGNE</p> <p>p. 53 Hommage Revue 3EI n°0</p> <p>p. 58 Conversion continu / alternatif pour alimentation inintermittible A. CUNIERE J.L. EOUZAN Lycée PIERRE DE COUBERTIN MEAUX</p> <p>p. 63 Annonces, Publications</p> <p>p. 67 Abonnements Revue 3EI & REE</p>
--	---

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

Ce 86^{ème} numéro de la revue 3EI est consacré à **quelques exemples de tractions électriques**. Nous poursuivons ainsi notre travail d'exploration sur le thème de la journée 3EI 2016. Les conférenciers de cette journée nous ont exposé avec souvent beaucoup de pédagogie et toujours beaucoup d'enthousiasme des applications aux véhicules routiers (voiture, vélo électrique, karts...). Le thème de ce numéro permettra de poursuivre notre route mais aussi de nous lancer à l'assaut des mers !

Le premier article du thème, écrit par M. Courault, traite de la traction électrique pour les propulsions marines. Son texte d'une très grande densité nous offre un panorama des solutions technologiques mises en œuvre sur les paquebots ou les navires de charge comme les méthaniers. Cette introduction est idéale pour ceux d'entre nous qui, ignorants du domaine, s'interrogent sur le mode de propulsion des géants des mers que sont les "Queen Mary 2" ou autres "Harmony of the Seas" construits par les chantiers STX de Saint-Nazaire.

L'article de Arnaud Sivert sur "Différentes Stratégies de pilotages pour Véhicule Electrique ; Optimisation : puissance moteur, énergie véhicule, temps...", rappellera à tous les participants de la journée 3EI, la très enthousiasmante présentation de son auteur mais aussi les intéressantes discussions autour de son bolide dans le hall d'honneur de la salle de conférence du CNAM !

Dans le dernier article du thème, l'équipe de Thierry Lequeu présente leur expérience de la réalisation d'un Kart électrique avec leurs étudiants d'IUT. Bien que le texte soit centré sur le kart électrique, leur expérience est aussi transposable à la réalisation de véhicules non terrestres (bateaux électriques, ULM, treuils électriques...) ou terrestres (Gyropodes, vélo ou tricycles électriques ...). Si vous souhaitez vous lancer dans l'aventure, n'hésitez-pas à vous mettre en contact avec les auteurs...

Hors thème :

Quoi de plus commun qu'une batterie de Smartphone ? Qui n'a jamais pesté contre un téléphone mobile qui se décharge trop vite ? Que faut-il faire pour optimiser la durée de vie de ses batteries ? Autant de questions que nous nous sommes tous déjà posé et qui sont maintenant presque vitales pour nos étudiants hyper connectés ! Arnaud Sivert et son équipe proposent de répondre à ces interrogations dans un article très pédagogique relatant le travail mené avec leurs étudiants.

Les deux derniers articles du numéro 86 constituent un hommage aux fondateurs de la revue 3EI. En effet, en mai 1994 paraissait le numéro "0" de la revue. Vous retrouverez deux extraits de ce numéro initial qui lançait cette aventure qui se poursuit depuis 22 ans !

L'ambition de ces fondateurs reste la notre. Nous souhaitons que la revue soit "un moyen favorisant les échanges pédagogiques entre les enseignants" du domaine du génie électrique et plus généralement des sciences et technologies.

L'année 2017 arrive à grands pas. N'hésitez pas à nous proposer vos articles que nous serons heureux de diffuser au plus grand nombre. Si vous manquez d'idées de thèmes à aborder, en voici trois que nous envisageons de traiter dans nos prochains numéros :

- Les systèmes magnétiques,
- Maintenance des systèmes pluri technologiques,
- TIPE en CPGE.

Bonne lecture.

Le Comité de Publication de la Revue 3EI

**Faites connaître notre revue !
Vous en assurez ainsi la pérennité.**

La Revue 3EI

Comité de publication

Hamid BEN AHMED

Arnaud BRUGIER

Jacques COURAULT

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean Michel GAY

Jean-Philippe ILARY

Chérif LAROUCI

Marie-Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Denis LABROUSSE

Pascal LOOS

Marc PETIT

Sylvain PIETRANICO

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

BULLETIN D'ABONNEMENT A LA REVUE 3EI Année 2017
n°87 (Janvier 2017), n°88 (Avril 2017), n°89 (Juillet 2017) et n°90 (Octobre 2017)

Pour l'année 2017, nous vous proposons

3 formules d'abonnement :

- Formule « papier SEUL »
- Formule « papier et accès aux articles numériques au format pdf » sur le site SEE revue 3EI
- Formule « accès aux articles numériques au format pdf SEUL » sur le site SEE revue 3EI

➤ <u>Abonnement individuel</u>	France et pays de l'UE	Pays hors UE
Abonnement « papier »	40 €	50 €
Abonnement papier <u>et accès aux articles numériques</u>	46 €	56 €
Accès aux articles numériques	30 €	

➤ <u>Abonnement « collectivités »</u>	France et pays de l'UE	Pays hors UE
Abonnement « papier »	57 €	70 €
Abonnement papier <u>et accès aux articles numériques</u>	67 €	80 €

L'abonnement collectivités concerne les bibliothèques, CDI, laboratoires, entreprises, universités, écoles d'ingénieur, lycée, IUT ...). Prendre soin de mentionner sur le bon de commande le lieu de livraison de la revue ainsi que le destinataire (personne physique ou service).

TRES IMPORTANT L'adresse électronique à laquelle vous recevrez le code d'accès au site de la SEE-revue 3EI est indispensable en cas d'abonnement avec accès numérique.

<p>Nom : Prénom :</p> <p>Adresse d'expédition de la revue 3EI :</p> <p>Rue, n° :</p> <p>Code postal : Ville :</p> <p>Pays :</p> <p>Adresse électronique :</p> <p>Activité (pour statistiques) :</p>
--

Adresser le bulletin renseigné, accompagné d'un chèque libellé à l'ordre de :
SEE- la revue 3EI ou d'un bon de commande pour les collectivités, à l'adresse suivante

<p>SEE-la revue 3EI 17 rue Hamelin, 75783 PARIS CEDEX 16</p>

<p>Vous pouvez également vous abonner sur le site http://www.see.asso.fr/3ei</p>

Les convertisseurs pour les propulsions marines

Jacques COURAULT

Résumé : Dans cet article sont évoqués et comparés les convertisseurs ou variateurs de vitesse utilisés pour la propulsion des navires de surface à vocation commerciale.

Quelques explications sur les fonctionnements possibles du cycloconvertisseur sont données, avantages et inconvénients, principalement pour les réseaux de bord. Ce convertisseur, fut le premier à être utilisé en propulsion, aujourd'hui il peut être considéré comme obsolète du fait du développement des convertisseurs dits indirects.

Pour les puissances supérieures à environ 16 MW les convertisseurs indirects en courant sont difficilement contournables. Quelques explications sont données sur ces convertisseurs (redresseur / onduleur) peu pris en considération dans la littérature technique.

Pour les puissances plus faibles, du fait du développement des composants blocables par la commande, les alimentations en tension s'imposent. Les schémas possibles sont nombreux, plusieurs sont évoqués, en particulier avec des solutions multiniveaux adaptés pour monter en tension, donc en puissance. Ces convertisseurs dits MLI voire DTC, sont largement expliqués dans la littérature technique, c'est la raison pour laquelle les fondamentaux ne sont que partiellement évoqués.

Cependant, il ressort de cet article que les pulsations du couple électromagnétiques sont fondamentales, elles doivent être connues des mécaniciens qui dimensionnent les lignes d'arbres : ces pulsations font l'objet d'une évaluation.

Quelques architectures de propulsion sont proposées, avec leurs avantages et leurs inconvénients, certaines sont classiques d'autres plus futuristes elles s'inscrivent dans une évolution possible.

1. Introduction

Ces dernières décennies l'électronique de puissance a été l'un des moteurs de l'évolution des propulsions marines. Progressivement, les solutions vapeur et fioul ont été remplacées par des solutions électriques, jugées plus économique à l'exploitation et plus souples à l'utilisation. De plus les propulsions électriques autorisent des solutions de propulsions réparties, comme les POD par exemple, qui accroissent la manœuvrabilité des navires.

Nous allons dans cet article passer en revue les différents types de conversion dans un mode historique. Ce qui tient compte d'une part des composants de puissance disponibles et d'autre part de nos connaissances en matière de topologie des convertisseurs.

Le thyristor, dès le début des années soixante, a été le composant qui a initié, d'une manière générale, les motorisations électriques dans l'industrie. En propulsion marine c'est bien sûr des motorisations avec moteurs à courant continu, pour les petites puissances de l'ordre du mégawatt, et cycloconvertisseurs pour les puissances plus élevées qui furent les premières. La seule topologie pratiquée avec ces types de conversion était le pont de Graëtz. Au début des années quatre-vingts sont apparus

les premiers IGBT de puissance ouvrant la porte à l'alimentation des machines alternatives et plus particulièrement des machines asynchrones. Parallèlement les algorithmes de contrôle ont été développés et permis d'obtenir des performances comparables, voire supérieures, à celles obtenues avec les machines à courant continu alimentées par ponts de Graëtz.

2. Alimentation des machines par convertisseurs directs.

Le pont de Graëtz et le cycloconvertisseur, lui-même constitué de plusieurs ponts de Graëtz sont des convertisseurs directs par opposition à d'autres qui comportent entre réseau et machine un stockage d'énergie, en courant ou en tension, ils sont dits convertisseurs indirects.

2.1. Entraînement des moteurs à courant continu.

La topologie du pont de Graëtz est ancienne, elle date du début du 20^{ème} siècle, mais sa généralisation doit beaucoup aux thyristors, qui ne sont apparus sur le marché qu'au début des années 60. C'est dans le domaine des petites puissances ($P < 1\text{MW}$) que se font les premières propulsions, principalement quand une

fonction de positionnement dynamique est requise : en recherche scientifique ou dans l'industrie pétrolière.

Le pont de Graëtz ne permet pas naturellement la réversibilité en couple des machines, le courant est unidirectionnel. Cette réversibilité étant le plus souvent souhaitée, plusieurs solutions ont été envisagées :

- Deux ponts antiparallèles.
 - Circulation de courant (hautes performances dynamiques, non requises en propulsion).
 - Logique de basculement (bonnes performances dynamiques, non requises en propulsion).
 - Bande morte (calage au repos $\alpha > 140^\circ$, performances dynamiques très suffisantes en propulsion).
- Réversibilité par le champ. Suffisante dans une grande majorité des cas. A une époque les thyristors étaient des composants coûteux, donc une réversibilité par le champ, en inversant le

courant d'excitation, conduisait à des coûts moindres.

Avec ces dispositifs les quatre quadrants de l'espace C_{mot} , Ω_{rotation} sont accessibles. Mais les difficultés principales, qui sont essentiellement liées à la maintenance des moteurs à courant continu, demeurent (balais et collecteur). Aujourd'hui le moteur à continu est totalement abandonné.

2.2. Entraînement des moteurs à courant alternatif.

La puissance de certains moteurs de propulsion dépasse les 20 MW, l'utilisation du moteur à courant continu était impossible, les machines synchrones étaient les seules possibles à ce niveau de puissance. C'est dans ce but que les cycloconvertisseurs ont été développés et utilisés. Ils peuvent alimenter aussi bien des machines synchrones que des machines asynchrones.

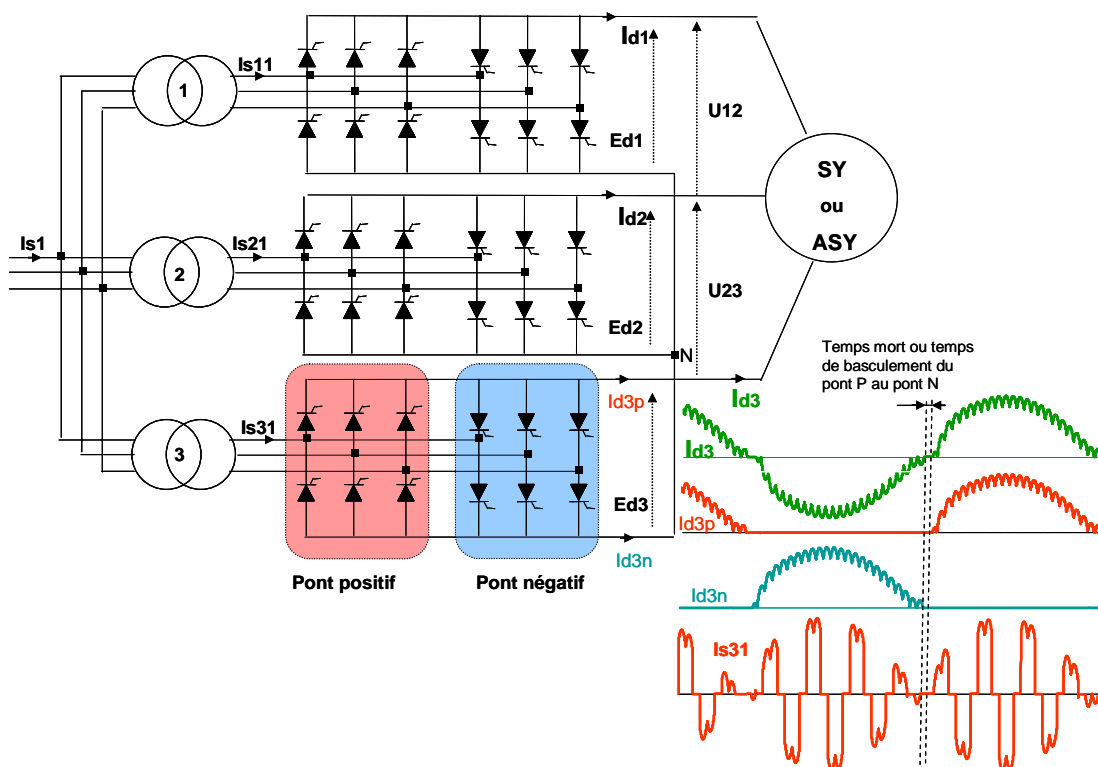


Figure 1 – Principe du cycloconvertisseur

Pendant plusieurs décennies le cycloconvertisseur a été considéré comme le convertisseur par excellence des propulsions de navires, en particulier sur les brise-glaces, application nécessitant des couples importants aux basses vitesses, voire à l'arrêt. La réputation n'est pas usurpée mais d'autres convertisseurs ont des performances équivalentes (voir les alimentations en courant). Les performances d'un cycloconvertisseur ont

pour origine sa topologie mais aussi son contrôle : maîtrise du flux et de l'angle interne de la machine. A l'origine, on ne parlait pas de contrôle vectoriel, mais c'est bien ce que les ingénieurs de l'époque ont dû mettre en œuvre pour contrôler de manière optimale le couple des machines.

Chaque phase machine est alimentée par un convertisseur réversible (deux ponts de Graëtz antiparallèles), le courant délivré est ainsi bidirectionnel. Soit le passage d'un pont sur l'autre est réalisé en circulation de courant soit il l'est avec une logique de basculement très performante, de manière à minimiser les temps morts. La figure 1 a retenu l'option logique de basculement ; ledit basculement ne peut se faire qu'à courant nul... La mesure d'un courant nul est toujours délicate à réaliser, aussi on préfère faire une détection de tension aux bornes des semi-conducteurs : tension aux bornes de tous les thyristors équivaut à un courant nul. Ce temps mort doit être inférieur à 2 ms.

Il faut noter dans la figure 1 que les convertisseurs de phase sont en étoile, cela permet d'augmenter la tension de sortie en introduisant sur les tensions E_{d1} , E_{d2} et E_{d3} de l'harmonique 3 (qui entre phases se trouve éliminé).

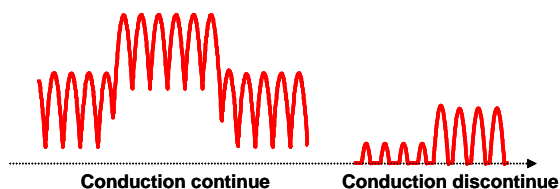


Figure 2 – Dynamique en courant

D'autres structures plus sophistiquées sont possibles. La figure 1 montre une structure hexaphasée mais des structures dodécaphasées sont envisageables, en dodécaphasé série ou dodécaphasé parallèle. Le but de ces options étant d'améliorer le contenu harmonique des courants sur le réseau.

D'une manière générale, la dynamique en couple des équipements de propulsion est faible... Mais les différents convertisseurs d'un cycloconvertisseur doivent avoir une grande dynamique en courant pour garantir une bonne qualité du couple : lesdits régulateurs doivent prendre compte les phénomènes de conduction continue et discontinue avec la même rapidité pour suivre une référence courant sinusoïdale.

De plus, comme le montre la topologie de la figure 1, la somme des trois courants machine doit être nulle, d'où la présence d'un quatrième régulateur, dit homopolaire, pour assurer cette fonction.

Comportement sur le réseau :

Le comportement d'un simple pont de Graëtz sur le réseau est bien connu, le $\cos\varphi$ est dépendant principalement du retard à l'amorçage α , donc du rapport E_d/E_{d0} : $\cos\varphi = \frac{E_d}{E_{d0}} = \cos\alpha - \frac{\pi}{6} \cdot X$, X étant la

réactance en « pu » de la source $X = \frac{L \cdot \omega \cdot I_{r\text{ eff fond}}}{V_{r\text{ eff}}}$ avec

$$I_{r\text{ eff fond}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$$

En fonctionnement onduleur le $\cos\varphi$ devient $\cos\varphi = \frac{E_d}{E_{d0}} = -\cos\gamma - \frac{\pi}{6} \cdot X$, γ étant l'angle de garde.

Les harmoniques de courant dépendent assez peu du retard à l'amorçage, α ou γ , du moins pour les rangs faibles, et en première approche, on peut les considérer de la forme $6.k \pm 1$ pour un simple pont de Graëtz, avec pour amplitude

$$I_{h5} = \frac{I_{r1}}{5}, I_{h7} = \frac{I_{r1}}{7}, I_{h11} = \frac{I_{r1}}{11}, I_{h13} = \frac{I_{r1}}{13} \dots$$

En dodécaphasé les fréquences harmoniques sont de la forme $12.k \pm 1$ les harmoniques de rang 5 et 7 disparaissent... Notons que ces résultats classiques ne sont valables qu'en fonctionnement stable. En régime dynamique, et a fortiori fortement dynamique, cette vision est simpliste, car deux α qui se succèdent ne sont pas identiques et bien d'autres harmoniques apparaissent. Nous sommes alors clairement dans le cas du cycloconvertisseur, qui en plus comprend trois convertisseurs réversibles décalés de $2\pi/3$. Autant dire que l'approche analytique est d'une grande complexité...

On ne peut plus parler de rangs harmoniques, mais de familles, autour des harmoniques réguliers du pont de Graëtz.

$$f_h = f_r \pm 6.k'.f_m \quad (1)$$

$$f_h = 5.f_r \pm 6.k'.f_m$$

$$f_h = 7.f_r \pm 6.k'.f_m$$

$$f_h = 11.f_r \pm 6.k'.f_m$$

$$f_h = 13.f_r \pm 6.k'.f_m \quad (2)$$

.....

$$f_h = (6.k \pm 1).f_r \pm 6.k'.f_m$$

Avec k' coefficient variable de 0 à l'infini, k coefficient variable de 1 à l'infini... La figure 3 est la représentation graphique des formules (1) et (2).

Dans le cas de la figure 1 les harmoniques principaux sont toujours les rangs 5, 7, 11, 13 ... avec pour amplitudes $1/5, 1/7 \dots$ Les autres rangs sont plus faibles, fluctuants et difficiles à calculer, mais ils sont dangereux pour le réseau d'alimentation surtout en présence de filtres sur ledit réseau, où ils peuvent exciter des résonances parallèles. Ce qui conduit à avoir des filtres fortement amortis, donc de mauvaise qualité...

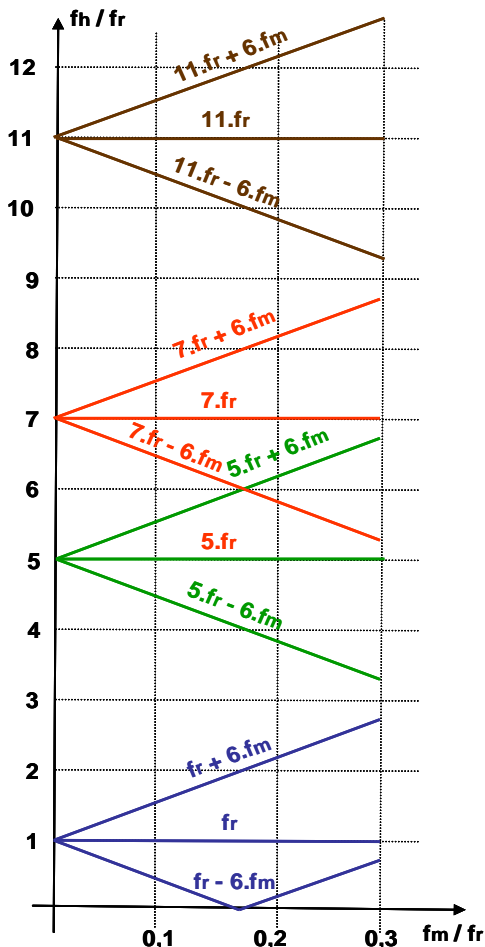


Figure 3 - Harmoniques de courant sur le réseau d'alimentation.

Le facteur de puissance F doit prendre en compte la

puissance déformante $D = 3 \cdot V \cdot \sqrt{\sum_k I_h^2}$

$$F = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{S_1} \cdot \frac{S_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \cdot \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2}}$$

S est la puissance apparente totale, l'indice 1 désigne que les grandeurs indicées ne prennent en compte que le fondamental.

Ces grandeurs sont donc calculées avec la valeur efficace du fondamental du courant réseau et ϕ_r le déphasage entre V et I_{r1} . I_{r1} étant une grandeur fluctuante, la $\cos\phi_r$ est alors le résultat d'une moyenne calculée sur plusieurs périodes de la tension machine.

Le courant actif sur le réseau découle directement de l'égalité des puissances, entrée/sortie, négligeant les pertes...

$$3V_1 I_{r1} \cos\phi_r = 3V_m I_m \cos\phi_m$$

Dans le cas d'une machine synchrone contrôlée avec $\phi_m = 0$, la relation se simplifie $I_{r1} \cos\phi_r = \frac{V_m}{V_1} I_m$

La composante du courant réseau est fonction du courant machine et du rapport entre la tension machine V_m et la tension réseau V_1 , mais tout cela est fluctuant... La composante réactive ne peut être calculée de cette manière, du fait de la non linéarité du convertisseur, le principe de Boucherot n'est alors pas applicable.

Ce convertisseur est d'une très grande complexité et difficile à simuler étant donné le nombre des interrupteurs (36 dans le cas le plus simple). Nous nous limiterons donc à ces quelques explications de base et à renvoyer le lecteur au livre de Messieurs Rombault et Séguier [1].

Notons malgré tout, les points faibles dans le cas des convertisseurs de propulsion :

- Consommation importante de puissance réactive, qui a conduit à imaginer des tensions de sortie trapézoïdales (l'idée est voisine de celle de l'harmonique 3, déjà évoquée).
- Puissance réactive fluctuante sur le réseau, d'où des difficultés de contrôle de la tension des réseaux de bord.
- Génération d'harmoniques à rangs variables avec la fréquence de sortie. D'où des difficultés de filtrage et un surdimensionnement des alternateurs (les amortisseurs étant principalement concernés).
- Limitation de la fréquence de sortie.

Compte tenu du découpage réalisé il est bien évident qu'aux fréquences élevées les formes d'onde en sortie sont de moins en moins convenables. Dans le cas le plus critique, il y a un risque d'engendrer des courants à des fréquences basses voire continue dans les transformateurs d'alimentation. Cette contrainte impose de ne jamais dépasser le tiers de la fréquence réseau pour la fréquence machine.

Le cycloconvertisseur a eu son heure de gloire avant 1990, quand des couples importants à l'arrêt étaient requis. Mais l'argument était surtout commercial, car les convertisseurs indirects en courant ont des performances sensiblement identiques (ils sont utilisés dans l'industrie sur des extrudeuses ou des banbury (malaxeurs de caoutchouc)).

3. Alimentation des machines par convertisseurs indirects.

Il en existe deux types, en courant et en tension. Les deux sont utilisés en propulsion : aujourd'hui les convertisseurs en courant ne sont utilisés que pour puissances de l'ordre de 20 MW ou plus. Le Queen Mary 2 a quatre moteurs de 21,5 MW (POD). Pour les puissances plus faibles la tendance est d'utiliser des convertisseurs de tension.

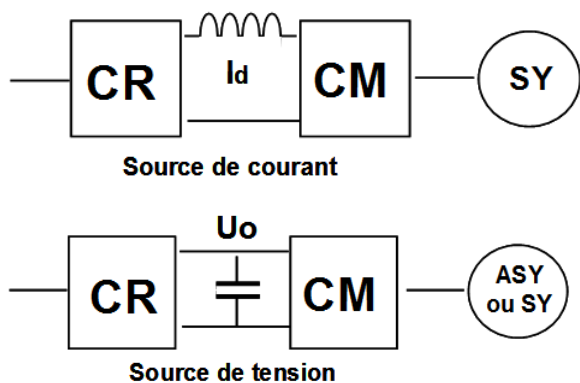


Figure 4 – Convertisseurs indirects.

Ces conversions sont à l'évidence moins polluantes, pour les réseaux, qu'un cycloconvertisseur puisqu'elles comportent un élément de stockage et filtrage entre un convertisseur dédié à la machine et un convertisseur dédié au réseau.

3.1. Convertisseurs en courant.

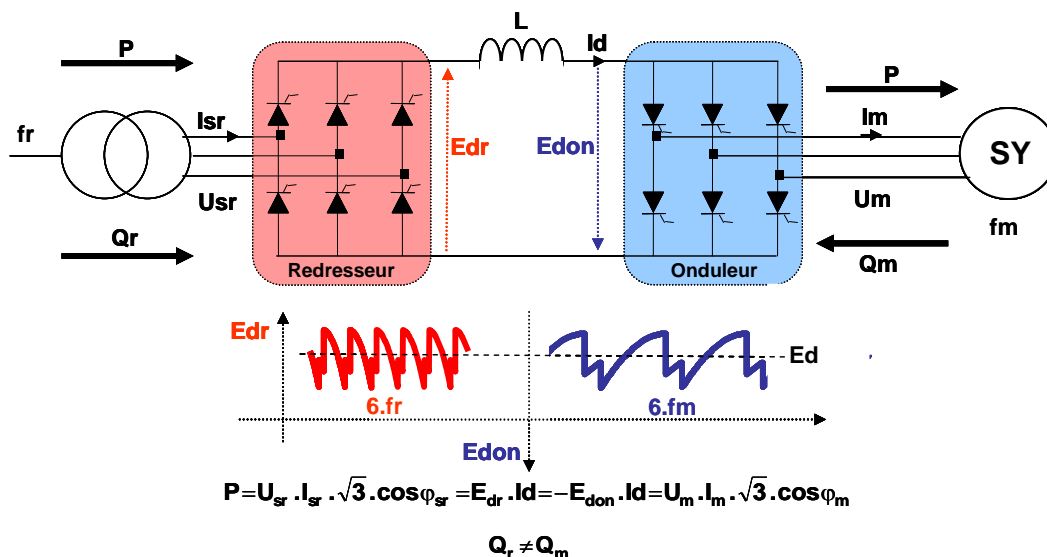


Figure 5 – Principe du redresseur / onduleur

La commande des thyristors du pont machine est synchronisée sur les tensions machines ou d'une manière plus générale sur la position de la roue polaire. Le pont onduleur se comporte comme un collecteur qui n'aurait que trois lames : il y a donc six positions des forces magnétomotrices. D'où la présence de pulsations de couple dont il faut tenir compte dans l'étude des lignes d'arbres.

Le fonctionnement est aisé à imaginer en présence de tensions statoriques, mais au démarrage les tensions sont absentes d'où la nécessité d'un capteur de position de la roue polaire pour commander, ou mettre en conduction, les thyristors qui engendreront un courant capable de produire le couple. Partant de la position de

3.1.1. Machine synchrone simple étoile.

Le premier brevet déposé sur cette topologie, en variation de vitesse, date de 1936, avec des redresseurs à vapeur de mercure, elle était destinée aux locomotives... D'autres réalisations ont été faites précédemment pour le transport d'énergie à courant continu (HVDC). Mais c'est dans les années 70 avec les premiers gros thyristors que la technologie se développe, d'abord pour des puissances de l'ordre de 2 MW en pétrochimie, gros compresseurs et vapocraqueurs, jusqu'à des puissances de l'ordre de 40 MW. Le début de son utilisation en marine date des années 80.

Nous évoquons ici des alimentations à thyristors, pour le convertisseur réseau comme pour le convertisseur machine. C'est dire que le fonctionnement n'est possible que sur une machine synchrone qui est capable de fournir la puissance réactive nécessaire à la commutation des thyristors.

la roue polaire on peut estimer la position du flux d'entrefer.

Le principe de production du couple dont l'expression est $\vec{C}_e = k \cdot \vec{\phi}_e \wedge \vec{I}_m$, est rappelée sur la figure 6. Le système d'axes d, q est directement lié à la position de la roue polaire, donc au flux à vide ϕ_0 , il tourne à la vitesse de la machine dans le stator qui est fixe. Le système d'axes a, b lié au flux d'entrefer tourne également à la vitesse de la machine. Entre les deux systèmes d'axes nous avons l'angle δ , appelé angle interne de la machine. Le triangle ABO est fixe, il est lié au stator : avec un onduleur hexaphasé et une machine bipolaire, chaque triangle a un angle AOB, de 60° électriques, lié aux thyristors en conduction, il a donc six

triangles... Dans une configuration donnée des thyristors, le courant I_m situé au centre du triangle est fixe. Sous l'action du couple la machine tourne, l'angle α passe progressivement de α_o à $\alpha_o + \pi/3$. Arrivé à $\alpha_o + \pi/3$ d'autres thyristors sont amorcés, on passe alors à un autre triangle. Le couple est maximal pour une valeur de $\alpha = \pi/2$.

On distingue deux types de fonctionnement :

- Si la tension machine est suffisante, le convertisseur machine est un onduleur...
- Si la tension est insuffisante (aux basses vitesses), un autre moyen doit être utilisé pour commander les thyristors. Un thyristor n'étant pas blocable par sa commande, la seule possibilité de blocage est l'annulation du courant qui le traverse. La commutation naturelle étant impossible, du fait des tensions faibles, le courant I_d doit être annulé un

court instant : les thyristors se bloquent et l'on peut en commander d'autres dans la séquence de rotation choisie. Pour assurer cette annulation du courant continu I_d , on bascule brutalement le fonctionnement du pont de redresseur en onduleur.

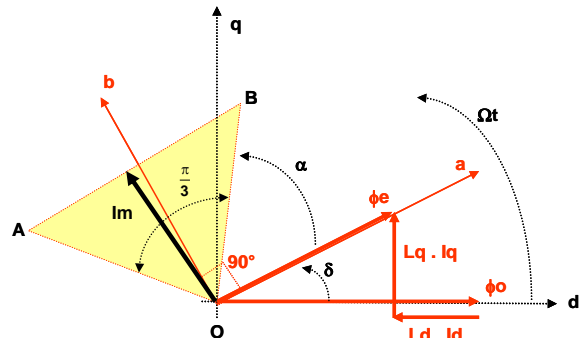


Figure 6 – Production du couple, machine synchrone.

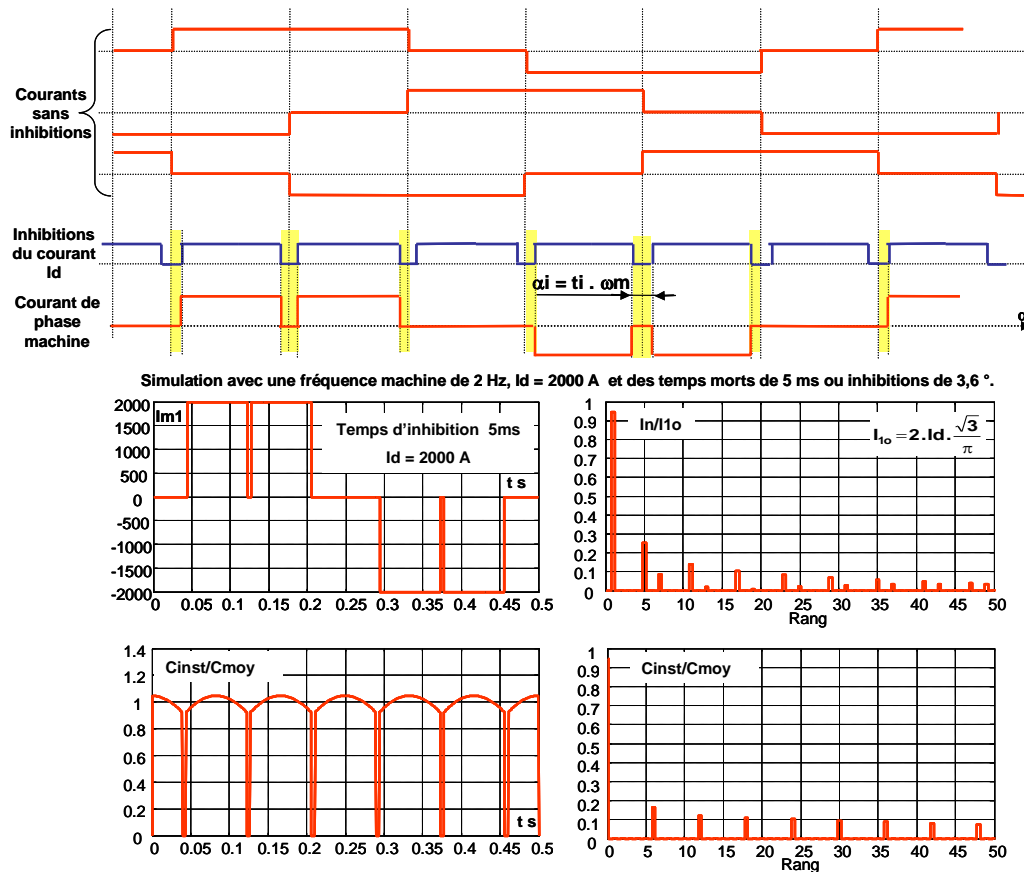


Figure 7 – Redresseur / Onduleur, fonctionnement en commutation assistée

La figure 7 résume le fonctionnement d'un Redresseur / Onduleur (R.O) en présence d'inhibitions du courant. Ces inhibitions ont une durée de l'ordre 5 ms, elles ont un effet sur la valeur du courant, ses harmoniques et bien sûr sur le couple. Le passage du fonctionnement assisté (par les inhibitions) et la commutation naturelle de l'onduleur s'effectue au dixième de la fréquence nominale de la machine.

Sur la figure 7 nous avons considéré une machine synchrone de fréquence nominale 20 Hz, donc la fréquence limite du mode assisté est de 2 Hz

Nous notons que la fft des courants de phase est peu affectée par les encoches dues aux inhibitions et cela d'autant moins que la fréquence est faible. Le couple électromagnétique instantané subit également l'effet des inhibitions, mais dans ce mode de fonctionnement rien ne s'oppose à un fonctionnement à $\cos\phi = 1$. La

fréquence des inhibitions étant six fois supérieure à celle de la machine il n'apparaît sur la fft du couple que les rangs 6, 12, 18... multiples de la fréquence d'alimentation de la machine.

La fft des courants a été ramenée à la crête du fondamental du courant de phase, sans inhibition, $I_{10} = 2 \cdot I_d \frac{\sqrt{3}}{\pi} I_m$.

La fft du couple a été ramenée à la valeur moyenne couple sans inhibition à $\cos\phi_m = 1$.

Pour les fréquences supérieures à la fréquence de transition (nous avons considéré 2 Hz) le convertisseur machine fonctionne de manière classique en onduleur. Les formules qui définissent son fonctionnement sont classiques mais la notion d'angle de garde γ devient fondamentale : elle prend en compte, le temps de blocage des thyristors et les réactances subtransitoires de la machine X_d'' et X_q'' .

On prendra comme inductance de commutation une réactance X qui est la moyenne géométrique des réactances dans les axes d et q $X = \sqrt{X_d'' X_q''}$. X est le plus souvent exprimé en « pu », $X = \frac{L \cdot \omega_m \cdot I_{sm}}{V_{sm}}$, avec L l'inductance de phase, ω_m pulsation machine, I_{sm} courant statorique fondamental et V_{sm} tension simple. En partant des formules de la commutation et de l'égalité des puissances, continue et alternative on arrive à préciser le $\cos\phi_m$ de la machine.

$$\text{En posant } E_{do} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{m\text{eff}} \text{ on arrive à} \\ \cos\phi_m = \cos\gamma - \frac{\pi}{6} \cdot X \quad (3)$$

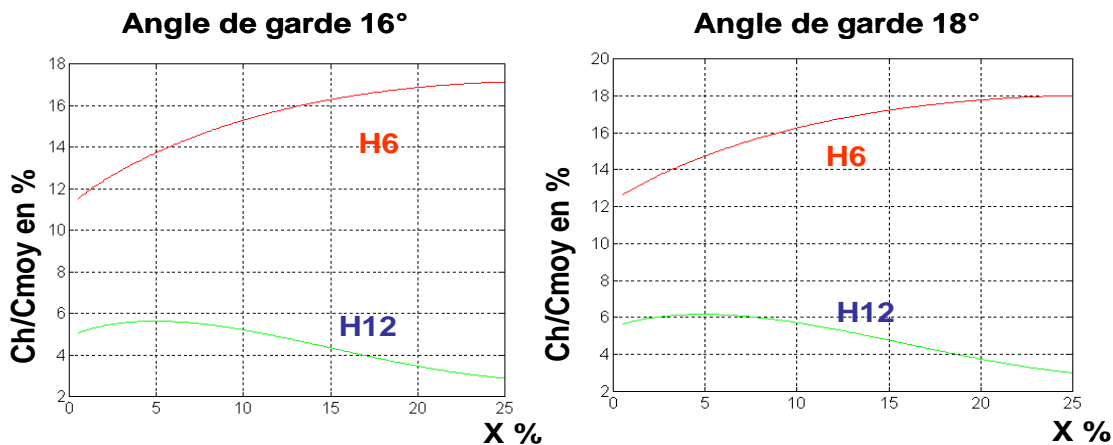


Figure 9 – Pulsations du couple électromagnétique.

Les pulsations de couple électromagnétique (figure 9) sont relativement élevées, acceptables dans bien des applications industrielles, elles peuvent cependant conduire à des difficultés mécaniques, en propulsion, dans les fonctionnements aux basses vitesses et en

Le $\cos\phi_m$ dépend donc des caractéristiques γ de l'onduleur et X de la machine.

La machine sera d'autant plus optimale que son $\cos\phi_m$ sera voisin de 1. Donc avec un angle de garde γ faible et des réactances subtransitoires faibles.

En général, pour les entraînements à relativement basses fréquences, γ est fixé à 15°. Le γ minimum pourrait correspondre à $2 \cdot t_q \cdot \omega_m$ max. (t_q étant le temps minimum que met un thyristor à se bloquer : pour les gros composants ~ 500 μ s).

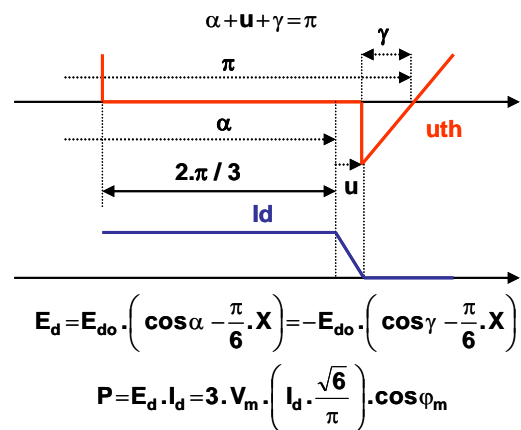


Figure 8 – Blocage d'un thyristor.

X est la réactance subtransitoire de la machine, Sa valeur est en générale comprise entre 15 et 20% (là encore il s'agit d'un compromis technico-économique).

particulier au freinage (crash stop ou arrêt en catastrophe) des navires.

Note 1 : Dans bien des applications une connaissance des pulsations de couple est requise pour

l'étude de la ligne d'arbres. En propulsion, les lignes d'arbres sont sollicitées par deux couples, le couple électromagnétique et couple pulsant des pales de l'hélice. Des lignes d'arbres de plus de dix mètres ne sont pas rares : si l'on considère que la torsion normale d'un arbre correctement dimensionné est au minimum de 1/4° par mètre au couple nominal, on prend conscience que des fréquences propres de torsion puissent être excitées (pour n'évoquer que les problèmes de torsion). Nous estimons que dans tous les cas les mécaniciens qui dimensionnent les lignes d'arbres doivent être informés de la nature harmonique du couple électromagnétique.

Note 2 : La tension statorique visible avec un oscilloscope, ne reflète qu'une partie de la réalité électrotechnique. Avec une alimentation en courant, le courant est par définition constant entre les commutations. Donc ce qui est observé entre les commutations, c'est une tension interne qui est en amont des réactances ($L \cdot di/dt = 0$). La tension interne de la machine n'a pas beaucoup de signification, du moins pour le constructeur de machine. Là encore, il est préférable de s'exprimer en grandeurs fondamentale, en partie pour la puissance réactive demandée à la machine, puissance réactive qui dimensionne son excitation. Clairement $\cos\phi_m$ défini par la formule 3 est dit interne et pour la machine il est préférable d'évoquer des grandeurs externes, relatives aux fondamentaux...

$$\cos\phi_{m \text{ ext.}} = \cos \left[\arctg \left(\frac{\sin\phi_{m \text{ int.}} - X_{\text{int.}}}{\cos\phi_{m \text{ int.}}} \right) \right] \quad (4)$$

$$U_{m \text{ ext.}} = U_{m \text{ int.}} \cdot \frac{\cos\phi_{m \text{ int.}}}{\cos\phi_{m \text{ ext.}}} \quad X_{\text{ext.}} = X_{\text{int.}} \cdot \frac{U_{m \text{ ext.}}}{U_{m \text{ int.}}}$$

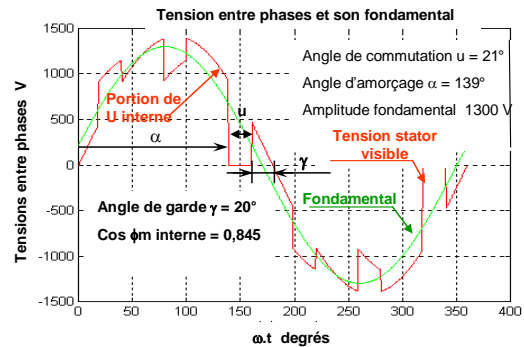


Figure 10 – Tensions interne et externe

3.1.2. Machine synchrone deux étoiles.

Trois raisons principales expliquent que la machine synchrone à deux étoiles est privilégiée dans l'application à la propulsion marine.

- Pour augmenter la puissance.
- Pour réduire les pulsations du couple électromagnétique.
- Pour introduire une redondance, avec un demi-moteur.

De plus cette structure permet de réduire la pollution harmonique sur le réseau d'alimentation avec une structure dodéphasée.

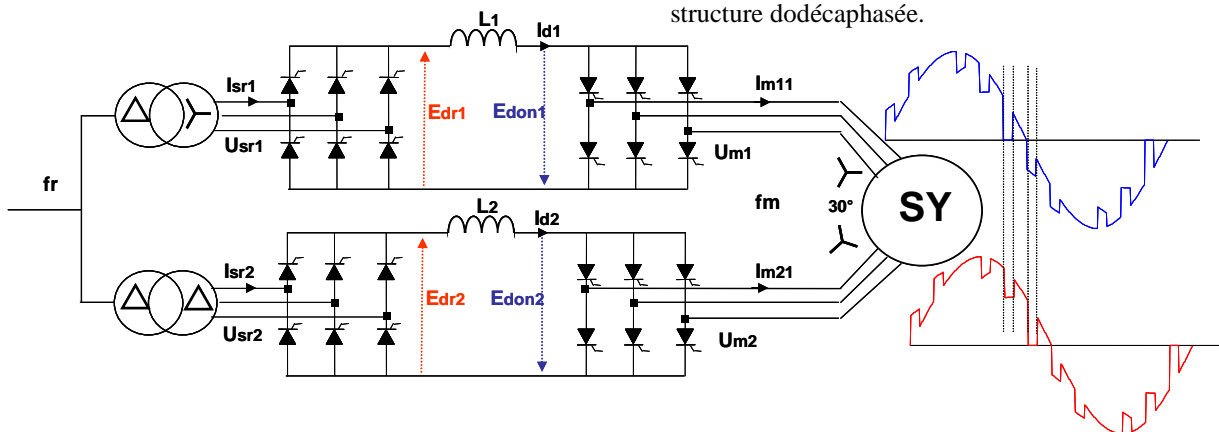


Figure 11 - Alimentation classique d'une machine deux étoiles décalées de 30°.

Avec une seule étoile nous avons l'équivalence avec un moteur à courant continu à trois lames, avec deux étoiles décalées de 30° nous avons une équivalence avec un moteur à six lames. Hélas, il existe naturellement un couplage ($K \sim 0,66$) entre les deux étoiles, ce qui fait que les commutations d'une étoile sont visibles sur l'autre... D'où des contraintes supplémentaires au niveau de l'angle de garde γ .

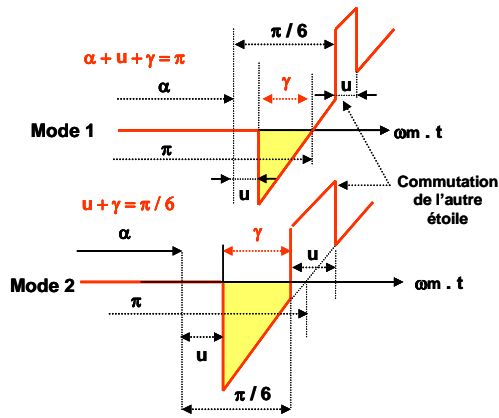


Figure 12 – Les modes de commutation.

Pour X faible, ou I_s faible ($X = X_n \frac{I_s}{I_{sn}}$) nous avons dans un mode dit 1, un couplage entre les étoiles est sans influence, $\alpha + u + \gamma = \pi$, donc la formule 3 est toujours valable. Mais pour $\alpha < 5\pi/6$ l'angle γ est influencé par l'encoche de commutation de l'autre étoile (figure 12).

Dans le cas contraire (mode 2), $\alpha + u + \gamma \neq \pi$, et $u + \gamma = \pi/6$. La formule 3 n'est plus valable.

Pour $X > \frac{3}{\pi} \cdot (\cos\gamma - \frac{\sqrt{3}}{2})$ elle devient

$$\cos\varphi_m = \cos\left(\frac{\pi}{12} - \frac{\gamma}{2}\right) \sqrt{1 - \frac{\pi^2 X^2}{36 \sin^2\left(\frac{\pi - \gamma}{12}\right)}} \quad (5)$$

Il existe même un mode 3 quand α étant plus petit, c'est le sommet de l'encoche de commutation de l'autre étoile qui vient couper l'axe et modifie encore une fois la définition de l'angle de garde. Ce dernier mode n'est pas utilisé en propulsion, il ne l'a été qu'en traction ferroviaire...

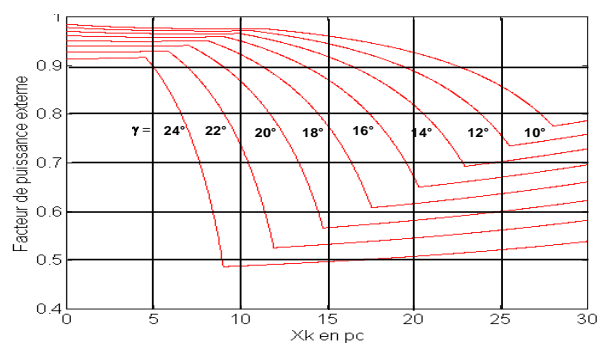
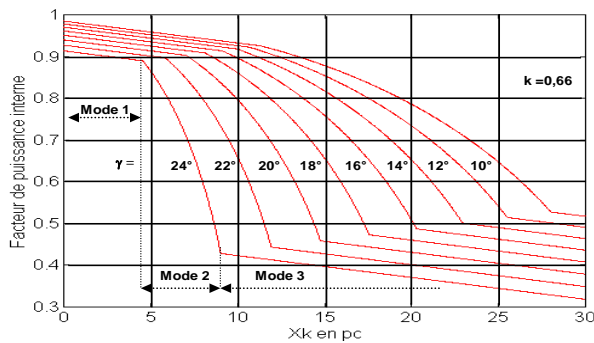


Figure 13 – Facteur de puissance d'une machine synchrone, deux étoiles, alimentée par R / O

comme bon. Il n'entraîne aucun surdimensionnement des machines.

Pour des angles de garde modérés, compris entre 15° et 20° et des réactances faibles, de l'ordre de 10%, le facteur de puissance (figure 13) doit être considéré

Note 3 : L'angle de garde γ et la réactance subtransitoire sont les paramètres clés du dimensionnement. X doit faire l'objet d'une spécification précise et γ doit être une grandeur rigoureusement ajustée par le contrôle : il est même souhaitable que cet angle soit contrôlé en boucle fermée.

Note 4 : Les inductances de lissage L_1 et L_2 de la figure 11 ont pour mission de « lisser » les courants continus I_{d1} et I_{d2} . Les ondulations de ces courants ont deux origines ; les fonctionnements des redresseurs et des onduleurs qui sont par définition asynchrones. Ne pas lisser serait prendre le risque de commuter des courants élevés sur les onduleurs. De plus les ondulations obtenues sur les courants auraient des influences aussi bien sur le couple machine que sur la pollution du réseau. Généralement ces inductances limitent l'ondulation sur les courants I_d à 30% crête à crête, de la valeur moyenne.

$$\Delta I_{dcc} \text{ peut être mise sous la forme } \frac{L\omega\Delta I_{dcc}}{U_{eff}} = k(\alpha)$$

Les ondulations ΔI_d du redresseur et de l'onduleur s'ajoutant statistiquement, on obtient :

$$\Delta I_{dtotal} = \frac{1}{L} \left(k(\alpha_{red}) \frac{U_{r_{eff}}}{\omega_r} + k(\alpha_{ond}) \frac{U_{m_{eff}}}{\omega_m} \right) k(\alpha)$$

pour $\alpha = 90^\circ$ vaut approximativement 0,189....

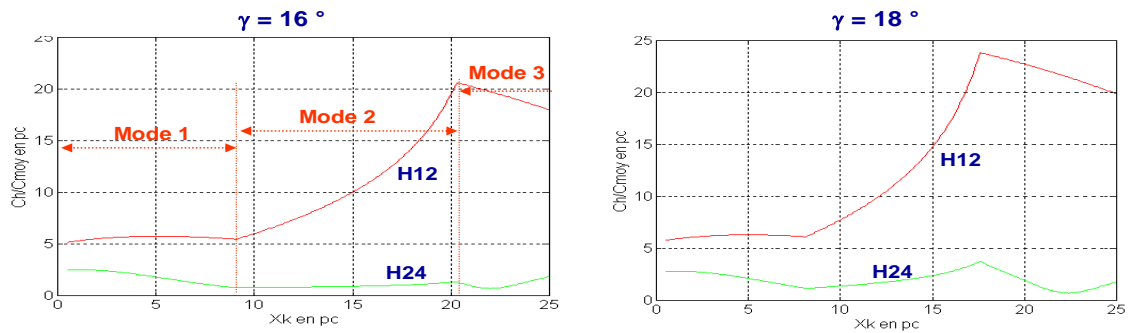


Figure 14 – Pulsations du couple électromagnétique d'une machine synchrone, deux étoiles, alimentée par R / O.

Effectivement, comme il fallait s'y attendre, les pulsations de couple sont beaucoup plus faibles qu'avec une machine simple étoile (figure 14).

Comme pour le facteur de puissance le dimensionnement optimal correspond à des angles de garde de l'ordre de 16° et des réactances de l'ordre de 10%.

Note 5 : L'excitation des machines synchrones de propulsion est réalisée en partant d'un réseau alternatif auxiliaire. Ce réseau alimente un gradateur triphasé à thyristors qui contrôle l'excitation de la machine synchrone, donc son flux, en passant par un transformateur tournant qui alimente un pont de diodes. Un transformateur tournant est très proche d'une machine asynchrone à rotor bobiné, ce rotor bobiné alimente un pont de diodes qui est tournant...

Note 6 – Le Queen Mary 2 a quatre moteurs de propulsion de 21,5 MW en POD (nacelles à l'extérieur de la coque), deux étant orientables et trois propulseurs d'étrave de 3,2 MW. Les quatre POD ont des moteurs synchrones, à deux étoiles, alimentés par R/O (mis en service en 2004).

Sur un POD orientable les courants transitent par des pistes et des balais.

A l'intérieur des POD il existe une ventilation pour évacuer les pertes de la machine. Cette ventilation qui met la structure en surpression est favorable son étanchéité.



Figure 14 – PODs du Queen Mary 2. Photographie Internet, prise à Saint Nazaire lors de sa construction.

Quand les conditions technico-économiques seront remplies il est possible que les POD soient équipés avec des machines synchrones à aimants permanents...

3.1.3. Comportement sur les réseaux de bord.

C'est le comportement typique des ponts de Graëtz...

En dodécaphasé (figure 11) les principaux harmoniques sont les rangs 11, 13, 23 et 25... Du fait des inductances entre redresseurs et onduleurs la fréquence machine n'est pratiquement pas visible. Hélas, la puissance réactive est incontournable, elle est en relation avec la vitesse (les tensions E_d) et le couple, qui sur une hélice est également fonction de la vitesse.

Les réseaux alternatifs sont utilisés depuis bien longtemps à bord des paquebots, des plates formes de forage ou autres navires... Le retour sur expériences industriel est donc important.

Sur les réseaux embarqués on observe deux particularités fondamentales qui conduisent à des difficultés de mise en œuvre des filtres qui sont toujours nécessaires, non seulement pour filtrer mais aussi pour améliorer le facteur de puissance.

- La puissance de court-circuit est variable, avec le nombre des générateurs présents sur le réseau... D'où un déplacement des résonances parallèles. Ceci a pour effet de déplacer les antirésonances, qui sont essentiellement en relation avec l'inductance du réseau. Il en résulte des possibilités de surtension.

- Sur les régimes transitoires la fréquence n'est jamais constante. Ceci entraîne un déplacement des fréquences harmoniques de perturbation, alors que les fréquences d'accord des filtres ne bougent pas. Il en résulte donc une augmentation du THD en tension.

Pour éliminer les écueils évoqués, le recours à des filtres fortement amortis est une nécessité, sur la figure 15 on peut constater que l'antirésonance du rang 5 a été fortement atténuée par l'adjonction, d'un mauvais filtre accordé sur le rang 3. Le but de ce filtre n'est pas de filtrer mais d'amortir.

Par souci de fiabilité, mais aussi pour prendre en compte les différents réseaux (propulsion et distribution) il est souvent nécessaire d'avoir plusieurs filtres sur un même réseau.

Le filtrage sur les réseaux alternatifs, bien que classique, n'est pas un problème simple. Avant d'arriver à une solution satisfaisante bien des calculs et des

simulations sont nécessaires pour arriver à un résultat acceptable, qui correspond à un THD en tension rarement inférieur à 5%.

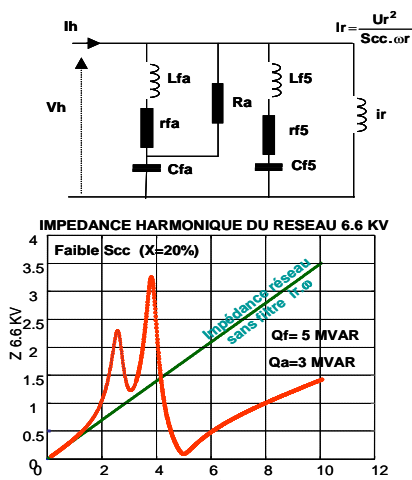


Figure 15 – Exemple de filtre.

3.2. Convertisseurs en tension.

Les convertisseurs de fréquence utilisés sont les mêmes qu'il s'agisse de machines asynchrones ou de machines synchrones. Du moins au niveau de la topologie, les différences sont dans les contrôles. Les convertisseurs doivent être réversibles pour assurer le freinage des lignes d'arbres.

3.2.1. Les montages utilisés.

On utilise des convertisseurs qui mettent en œuvre des composants blocables par la commande. Les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) et les IEGT (Injection Enhancement Gate Transistor),

La figure 16 représente la structure de base de ces convertisseurs. Elle comprend six interrupteurs, en fait, il s'agit de trois hacheurs réversibles en courant : un par phase.

Lesdits interrupteurs sont commandés en modulation de largeur d'impulsion (MLI), la durée de conduction est proportionnelle à une grandeur de commande : chaque hacheur reçoit une grandeur de commande décalée de $2\pi/3$ par rapport aux autres. L'amplitude maximale de la tension fondamentale de sortie obtenue pour la modulation maximale, est égale à E_d , tension continue d'alimentation du convertisseur.

Note 7 : Les IGBT sont des composants rapides, ils commutent vite, donc les pertes par commutation sont faibles, mais les pertes par conduction sont élevées. En électrotechnique, pour les fortes puissances, de grandes fréquences de découpage ne sont pas nécessaires. Des fréquences de découpage supérieures à dix fois la plus haute fréquence machine sont suffisantes (entre 500 et 1000 Hz). Dans ces conditions, les pertes dans les composants sont surtout des pertes par conduction, d'où pour les équipements de forte puissance une préférence pour les IEGT.

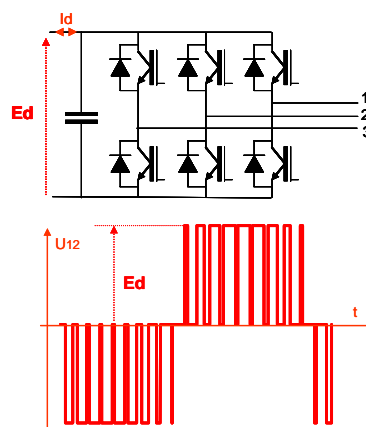
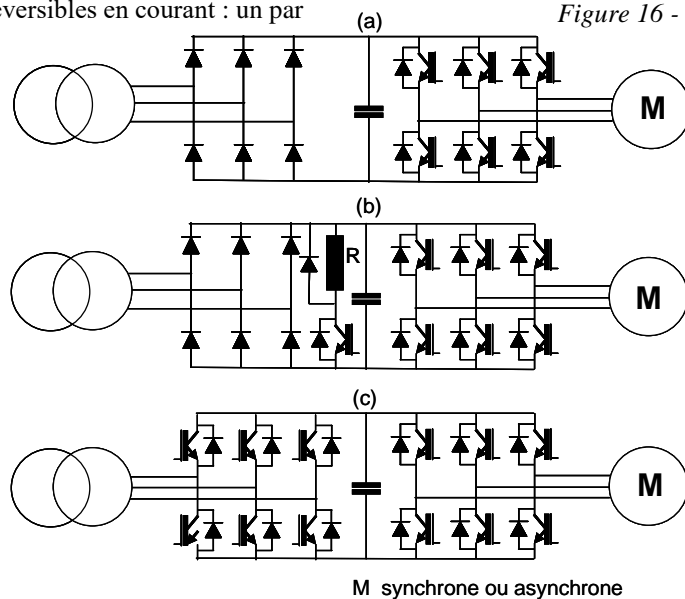


Figure 16 - Structure de base



M synchrone ou asynchrone

Figure 17 - Convertisseurs de fréquence : fréquence réseau / fréquence machine

Le schéma de la figure 16 est représentatif d'une conversion continu/alternatif. Le besoin final est une conversion alternatif/alternatif : réseau à fréquence fixe, machine à fréquence variable, d'où l'adjonction d'un convertisseur réseau de type alternatif/continu, pour élaborer la tension E_d .

La figure 17 résume les principaux schémas possibles...

(a) C'est le schéma de base, alimentation par un pont de diodes, le renvoi de l'énergie sur le réseau est impossible, le freinage de la machine ne peut se faire (ou alors de manière non contrôlée, par injection de courant continu, par exemple).

(b) Le schéma est le même, mais pour rendre le freinage possible, un hacheur alimentant une résistance est disposé dans la boucle continue. Le contrôle du hacheur maintient la tension E_d constante pendant le freinage.

(c) Les convertisseurs réseau et machine sont identiques, Le réseau peut récupérer l'énergie de freinage. Le convertisseur réseau fonctionne normalement avec $\cos \phi = 1$, mais il peut absorber de la puissance réactive sur le réseau, il peut également lui en fournir, en fonction de son dimensionnement.

Les schémas de la figure 17 sont des schémas basses puissances, ils sont limités sensiblement à 2 MW. On peut cependant les conserver pour des puissances plus importantes en mettant des composants en parallèle. Mais on peut également faire des associations de structures élémentaires.

Une structure possible est celle de la figure 18 (a), elle est presque équivalente à la mise en parallèle de deux structures triphasées de base mais, par rapport à une stricte mise en parallèle, les protections sont individuelles. La machine est un peu particulière, elle possède deux étoiles en phase et découplées. La réaction sur le réseau est dodécaphasée (on dit aussi 12 pulses). Pour réduire l'échauffement de la cage d'écureuil, ou des amortisseurs, par les courants harmoniques, il peut être souhaitable de décaler de 180° les fréquences de découpage.

Autre structure la figure 18 (b), qui associe en étoile des structures monophasées. Sur cette structure la fréquence de découpage est f_d , mais la fréquence de découpage apparente sur la tension de sortie est $2.f_d$ du fait du pilotage en opposition de phase des hacheurs... Puisqu'il s'agit d'une structure en étoile, on peut ajouter 15% d'harmonique 3, ce qui permet d'obtenir une tension entre phases en sortie, d'amplitude

$1,15 E_d$, il est bien évident que sur les tensions entre phases qui alimentent la machine, cet harmonique 3 disparaît.

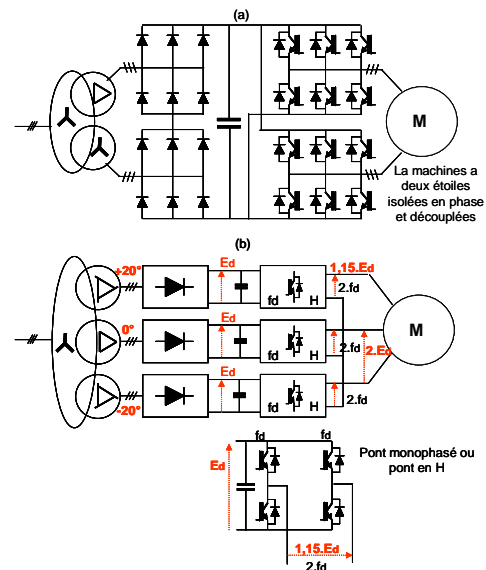


Figure 18. Associations de structures

Ainsi la machine est alimentée avec des tensions crêtes de $2.E_d$ ($1,15.E_d.\sqrt{3}$). Une analyse plus approfondie du schéma montrerait qu'il s'agit en fait d'un convertisseur 3 niveaux, donc assez favorable à la réduction des stresses sur les machines.

Ce dernier convertisseur est réalisé avec trois alimentations à courant continu... C'est favorable pour le réseau si l'on choisit une structure de redressement 18 pulses, mais le fait d'avoir trois bus d'alimentation est souvent réhibitoire vis-à-vis de l'architecture électrique globale.

Toujours en partant d'une structure de base à deux niveaux il est possible d'imaginer d'autres arrangements comme celui de la figure 19. Les deux tensions continues E_d sont isolées, ce qui autorise l'introduction d'harmonique 3 dans les modulations (s'il n'y avait qu'une seule et commune tension E_d , l'introduction d'harmonique 3 serait impossible). Ce qui est fondamental, c'est que là encore nous avons l'équivalent, pour la machine, d'une alimentation multinationaux.

Pour les propulsions, ce schéma permet d'introduire une certaine redondance, qui, sous puissance réduite présente des solutions de redondance. Cela n'est possible qu'en introduisant dans le schéma quatre sectionneurs...

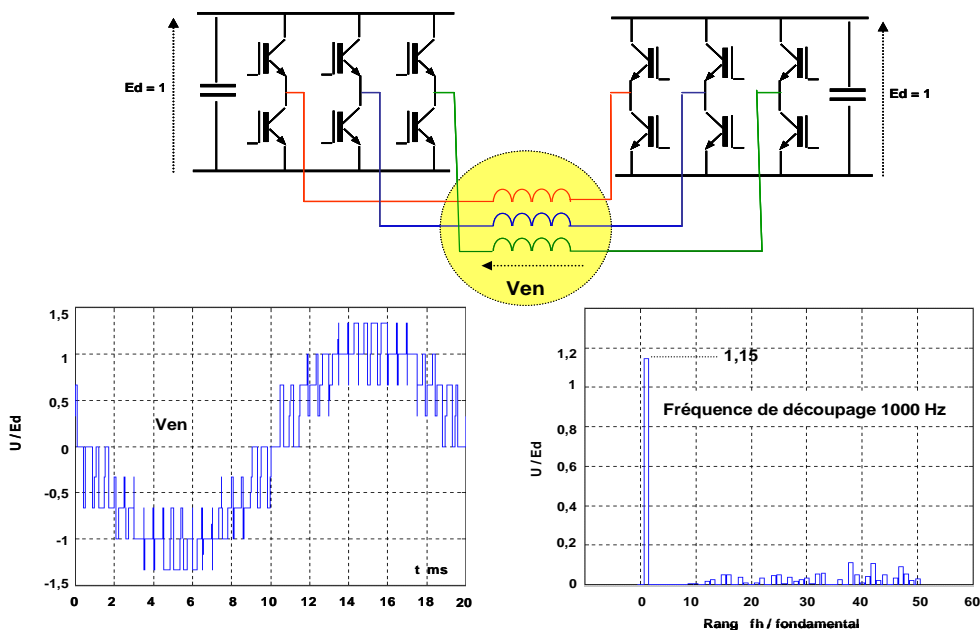
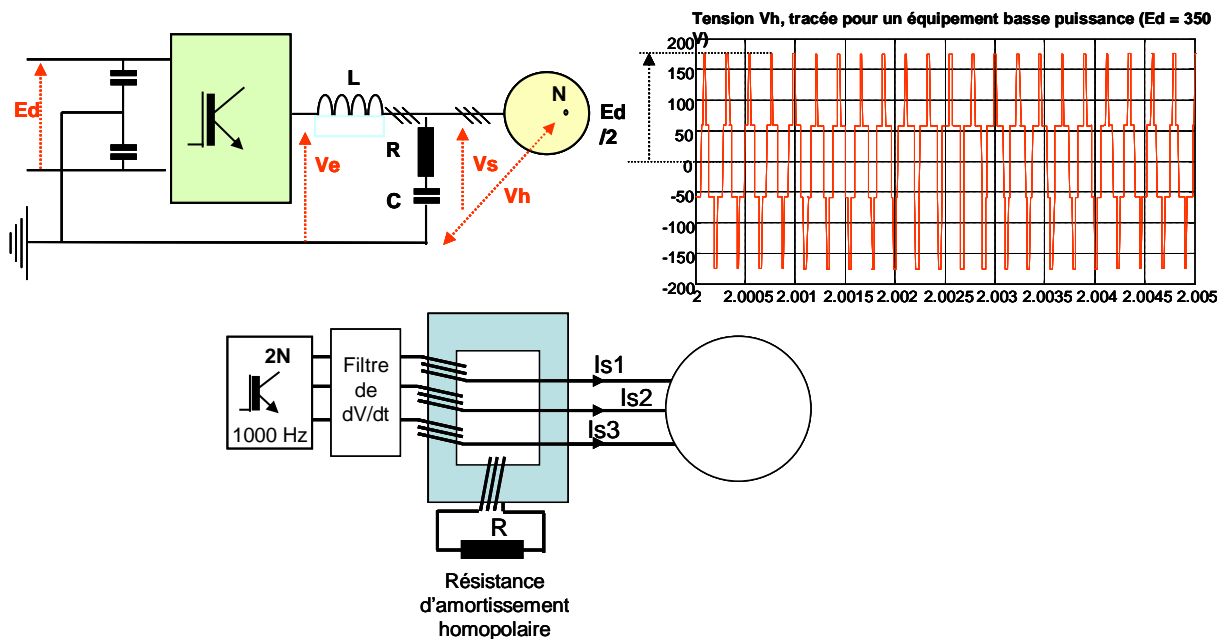


Figure 19 – Alimentation par deux convertisseurs et deux sources

Pour les équipements de forte puissance, les aspects multiniveaux sont fondamentaux pour réduire le stress sur les machines. Avec les gros IEGT (4500 V, 1000 A) la tension E_d peut être de l'ordre, pour un deux niveaux, de 2200V. Le fait d'appliquer des dV/dt importants sur les bobinages d'une machine n'est pas sans inconvénients. Il en résulte des courants capacitifs, qui affectent la durée de vie des isolants, qui peuvent générer des courants dans les paliers ou les organes mécaniques de la ligne d'arbres (réducteurs par exemple). De plus, pour les équipements militaires ou scientifiques, il peut y avoir des problèmes de

compatibilité électromagnétique. D'où la nécessité de réduire les dV/dt , soit en réduisant l'amplitude des fronts raides (d'où l'importance des solutions multiniveaux), soit en introduisant des filtres de dV/dt , pour les ramener à des valeurs de l'ordre de 500 $V/\mu s$.

La valeur de 500 $V/\mu s$ est généralement jugée satisfaisante par les constructeurs de machines, mais ce dV/dt peut encore, malgré tout, engendrer des courants de palier. Il est donc souhaitable dans certains cas critiques de compléter ce dispositif par une inductance homopolaire dans le but de présenter une forte impédance pour les courants de fuite (figure 20).



Rappel du principe de l'inductance homopolaire

Figure 20 – Protection des machines contre les dV/dt .

Note 8 : Les courants de palier sont connus depuis longtemps (origines magnétiques) et c'est pour cela que souvent un ou deux des paliers étaient isolés. Avec les alimentations à découpage cette option perdure mais son efficacité est assez douteuse. Cette isolation classique des paliers est assez faible et pour les courants à

fréquence élevée, qui résultent du découpage, elle se comporte comme un condensateur [8].

Pour augmenter la puissance des convertisseurs, deux solutions sont a priori possibles, soit associer des composants en série ou en parallèle, soit associer des structures.

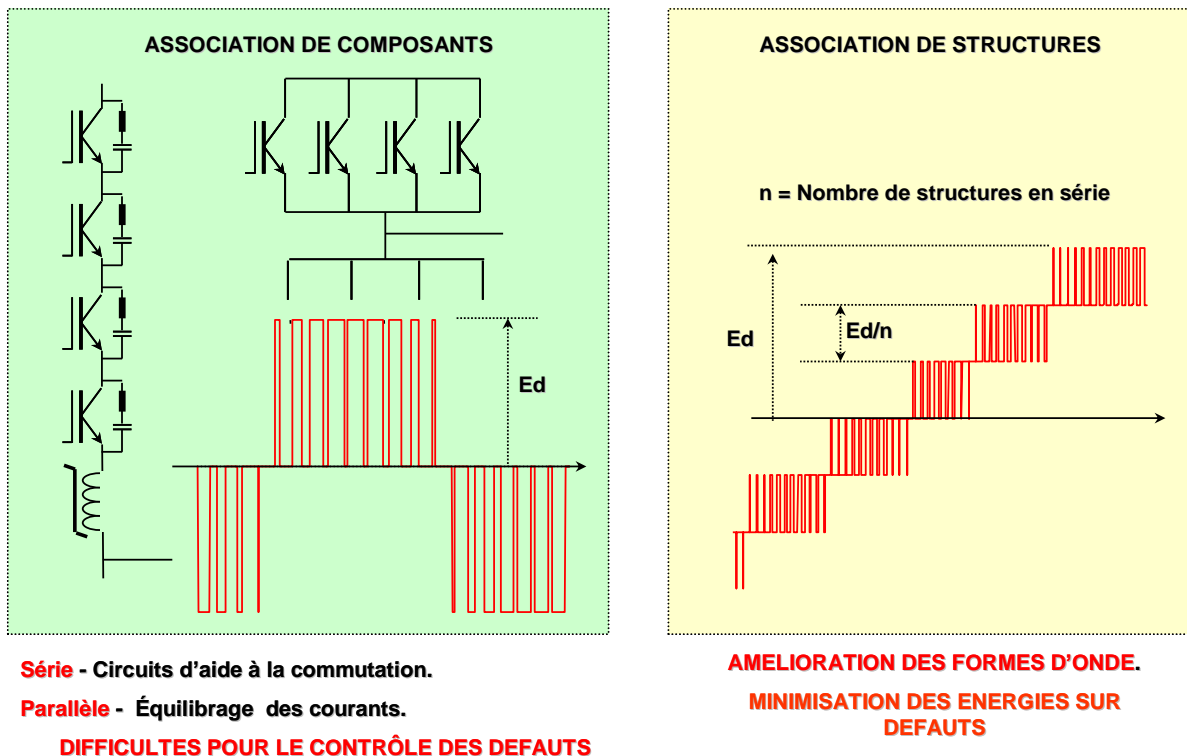


Figure 21 – Montée en puissance des convertisseurs

L'association de composants en parallèle est souvent réalisée, en traction ferroviaire par exemple, mais elle est assez délicate. Du fait de la compacité nécessaire il est bien difficile de mesurer et de contrôler l'équilibrage des courants. L'équilibrage se fait au niveau de la spécification des composants, voire de l'appairage.

L'association de composants de type IGBT ou IEGT en série est possible, mais exceptionnelle (même en HVDC). Pour compenser les inévitables différences, entre les temps de mise en conduction et de blocage de petites inductances saturables et des RC sont nécessaires dans les bras.

L'association des composants en série ou en parallèle se fait sur la base d'un convertisseur à deux niveaux, la tension E_d est donc importante, d'où des dV/dt préjudiciables à la bonne tenue des isolants des machines (voire des câbles) dans le temps. Le recours aux solutions multiniveaux est incontournable. Il existe plusieurs topologies possibles...

La topologie (a) de la figure 22, est un onduleur clampé à diodes ou onduleur clampé par le neutre... En fait il s'agit de la traduction plus ou moins littérale de Neutral point clamped inverter, NPC. 2 interrupteurs sont mis en série, du fait des condensateurs et des diodes, la tension aux bornes des interrupteurs est parfaitement maîtrisée. On dit qu'il s'agit d'une topologie à 3 niveaux qui sont visibles sur la figure 22 (a) à gauche : chaque niveau a pour amplitude $\Delta E_d = E_d/2$ et la fréquence de découpage est égale à deux fois la fréquence de commutation des interrupteurs élémentaires. Il est bien clair, par rapport à une structure à deux niveaux de la figure 16, que l'ondulation sur les courants est réduite.

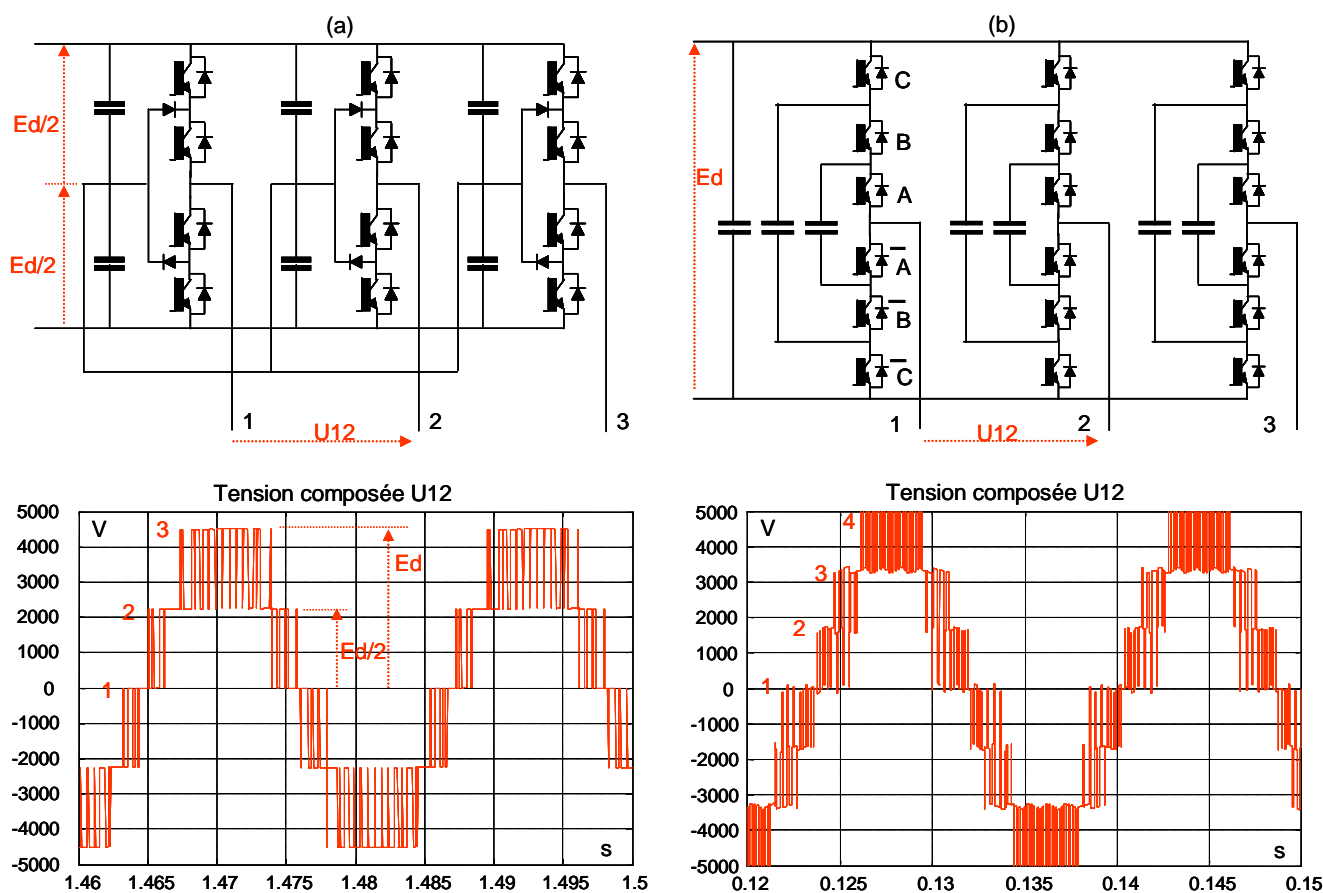


Figure 22 - Convertisseurs multiniveaux.

La topologie (b) est du type à cellules imbriquées, elle est 4 niveaux. Le schéma figure 22 (b) peut sembler compliqué mais il n'en est rien. Il ne s'agit en fait que de la mise en série de trois topologies 2 niveaux, (A, \bar{A}) , (B, \bar{B}) , (C, \bar{C}) . Les fréquences de découpage des topologies élémentaires, A, B et C sont décalées de 120° ce qui a pour effet d'introduire un équilibrage naturel des tensions aux bornes des condensateurs flottants, $Ed/3$ et $2.Ed/3$ et d'avoir une fréquence de découpage apparente entre phases de $3.f_d$. De ce fait les courants dans les phases des machines alimentées ont un contenu harmonique très faible [2], [3].

Le convertisseur (a) dit NPC est limité industriellement à 3 niveaux, le convertisseur (b) dit à cellules imbriquées est limité à 4 niveaux. Dans les deux cas un nombre supérieur de niveaux peut être envisagé, mais cela sort du cadre des propulsions...

En utilisant des composants de forte puissance, de type IEGT, la topologie (a) permet une puissance de 7 MW environ et la topologie (b) de 10,5 MW.

La figure 23 montre clairement l'influence des niveaux et de la fréquence de découpage sur les courants statoriques. Dans les trois cas la machine synchrone est la même du point de vue des réactances subtransitoires (en %). En deux niveaux le courant est fortement ondulé et plus le nombre des niveaux augmente, mieux le courant est lissé. La faiblesse relative du contenu harmonique des courants constitue un autre avantage des multiniveaux. D'abord pour la machine, car les harmoniques se retrouvent dans les amortisseurs sur les machines synchrones ou dans les cages d'écureuil sur les asynchrones. Ensuite il y a bien sûr des conséquences sur les pulsations du couple électromagnétique.

A titre d'exemple, la figure 24 illustre de cas de l'alimentation d'un moteur asynchrone par un convertisseur à 4 niveaux. L'intérêt du lissage du courant est ici encore évident.

Simulations tension, courant - Machine synchrone 5 MW, X = 20%
Fréquence élémentaire de découpage 1 KHz

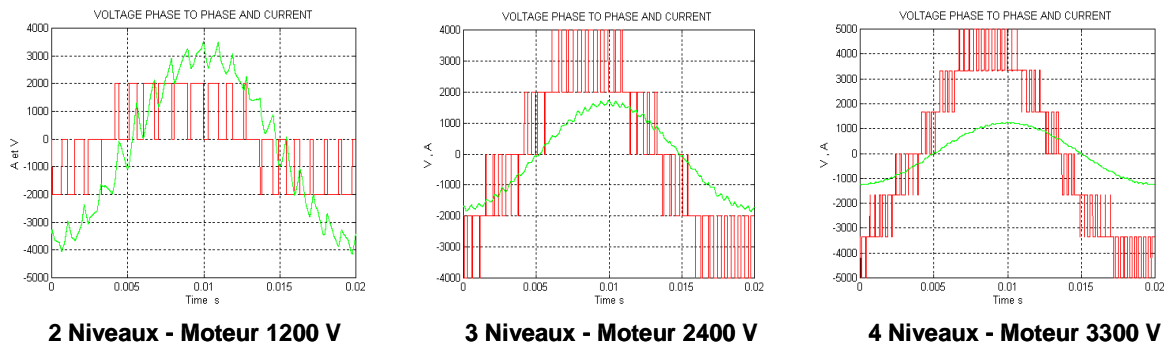


Figure 23 – Comparaison 2 niveaux, 3 niveaux, 4 niveaux.

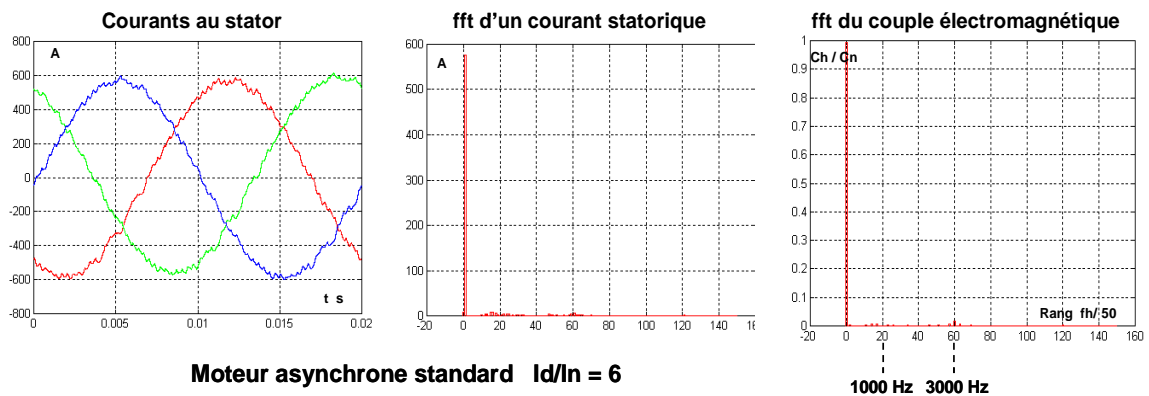


Figure 24 – Alimentation d'un moteur asynchrone de 3,3 kV, 2,7 MW par un convertisseur 4 niveaux.

Le convertisseur multiniveau à cellules imbriquées est maintenant bien connu. Les publications des Professeurs Foch et Meynard en particulier, sur le sujet sont nombreuses. C'est la seule qui permette de monter en tension facilement en variation de vitesse (il existe d'autres solutions en HVDC). Sa généralisation est freinée par le coût et surtout le volume des condensateurs flottants. En propulsion, où la place est toujours critique, les aspects liés à des encombrements trop importants sont rédhibitoires.

C'est donc le convertisseur à 3 niveaux de type NPC qui au fil des années s'est imposé dans le domaine des propulsions, il est aujourd'hui pratiqué par l'ensemble des constructeurs.

Ces convertisseurs multiniveaux peuvent dans bien des cas être considérés comme des convertisseurs élémentaires au même titre que le deux niveaux de la figure 16. Ce qui signifie qu'il est possible de les utiliser comme dans les figures 17, 18 et 19.

4. Exemples d'architectures de propulsion.

En alimentation de tension, comme en alimentation de courant, la nécessité d'augmenter les puissances conduit à utiliser des machines avec deux étoiles. Avec

les alimentations en courant, les étoiles sont décalées de 30° pour éliminer l'harmonique 6 du couple électromécanique. En alimentation tension cela n'a pas de sens, les étoiles sont en phase et découplées.

Note 9 : A y regarder de près, les convertisseurs MLI peuvent introduire des harmoniques 5, 7, 11 et 13...qui ont pour origine les temps morts de la commutation des IEGT...(figure 25). Leurs amplitudes respectives sont fortement dépendantes de l'angle de commutation mais restent toujours inférieures 20% de celle du fondamental. Quand on néglige les durées de commutation, les harmoniques engendrés pour un pont de diodes ou un pont à thyristors sont identiques. Mais avec les durées de commutation, plus le rang est élevé, plus la différence est importante.

Le schéma de la figure 26 est réalisé avec deux étoiles et des convertisseurs NPC. Sur ce schéma il convient de noter l'absence de compensation et de filtres. L'utilisation de ponts de diodes alimentés par des transformateurs étoile / triangle avec des primaires à triangles prolongés (pour obtenir un déphasage de 7,5°) permet cette option. Noter que les quatre transformateurs sont identiques : une certaine rotation de phases introduit un déphasage +7,5°, avec une autre rotation des phases on obtient -7,5°. Donc entre les deux

primaires nous avons 15° , d'où une réaction 24 pulses sur le réseau. Il est préférable d'utiliser des

transformateurs secs, mais si un gain de place est nécessaire, des transformateurs à huile sont possibles.

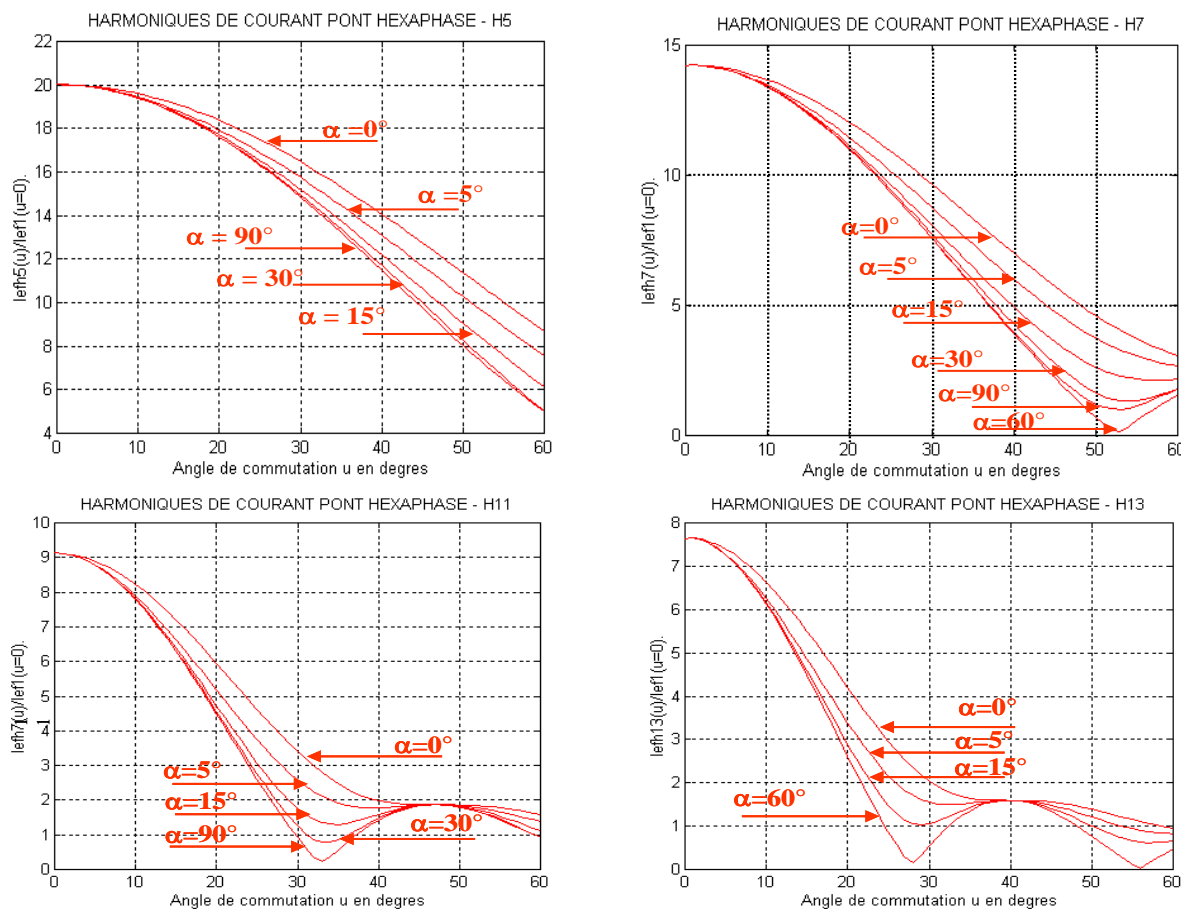


Figure 25 – Comparaison pont de diodes et pont à thyristor.

En fait il existe deux bus à courant continu, l'un dit bâbord l'autre dit tribord. Les points milieux de ces bus sont mis à la masse du bâtiment, par l'intermédiaire d'une résistance de faible valeur (pour limiter un éventuel courant de défaut, pendant l'ouverture des disjoncteurs), de manière à symétriser les contraintes en tension. Le courant dans cette résistance est mesuré pour apprécier l'isolement du réseau et de la machine...

La structure de propulsion (deux moteurs couplés et un réducteur) peut éventuellement engendrer des problèmes de stabilité. Si l'on considère que les liaisons moteurs / réducteur sont parfaitement rigides il n'y a aucune difficulté... Mais si on prend en compte la rigidité des arbres des difficultés apparaissent, surtout si l'on imagine entre les deux moteurs des raideurs différentes, ce qui peut parfaitement arriver avec un vieillissement prématuré des accouplements [7].

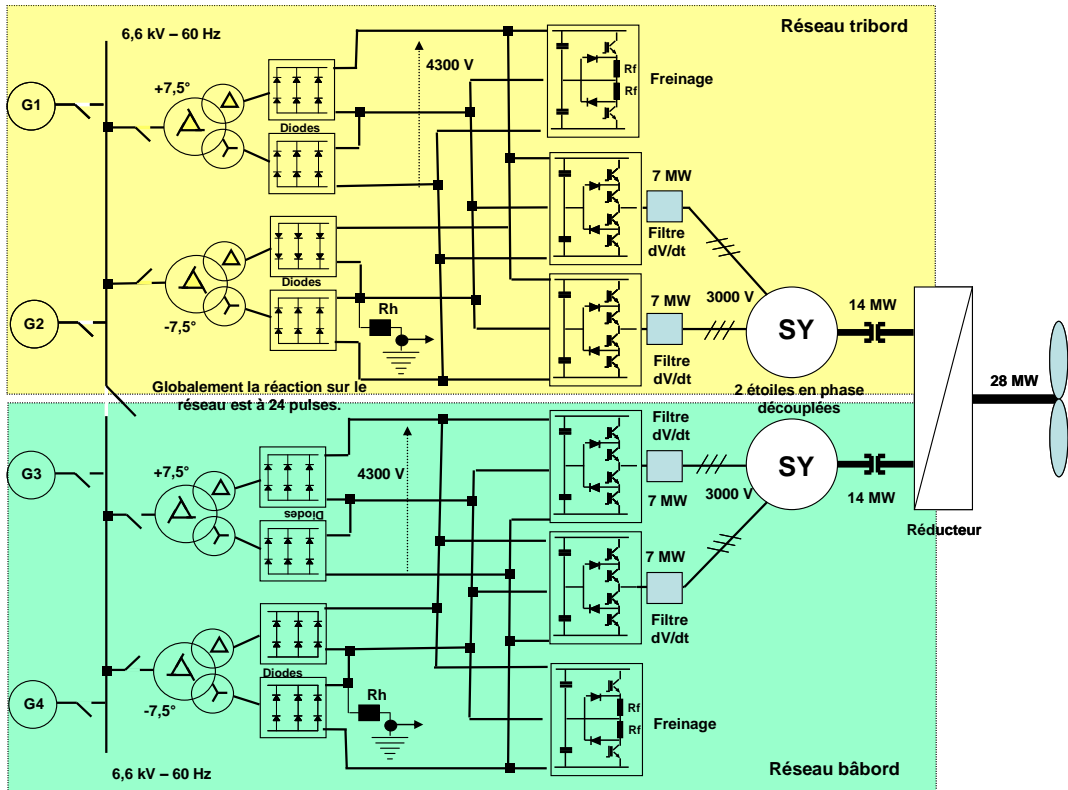


Figure 26 – Exemple de propulsion avec machines synchrones et NPC

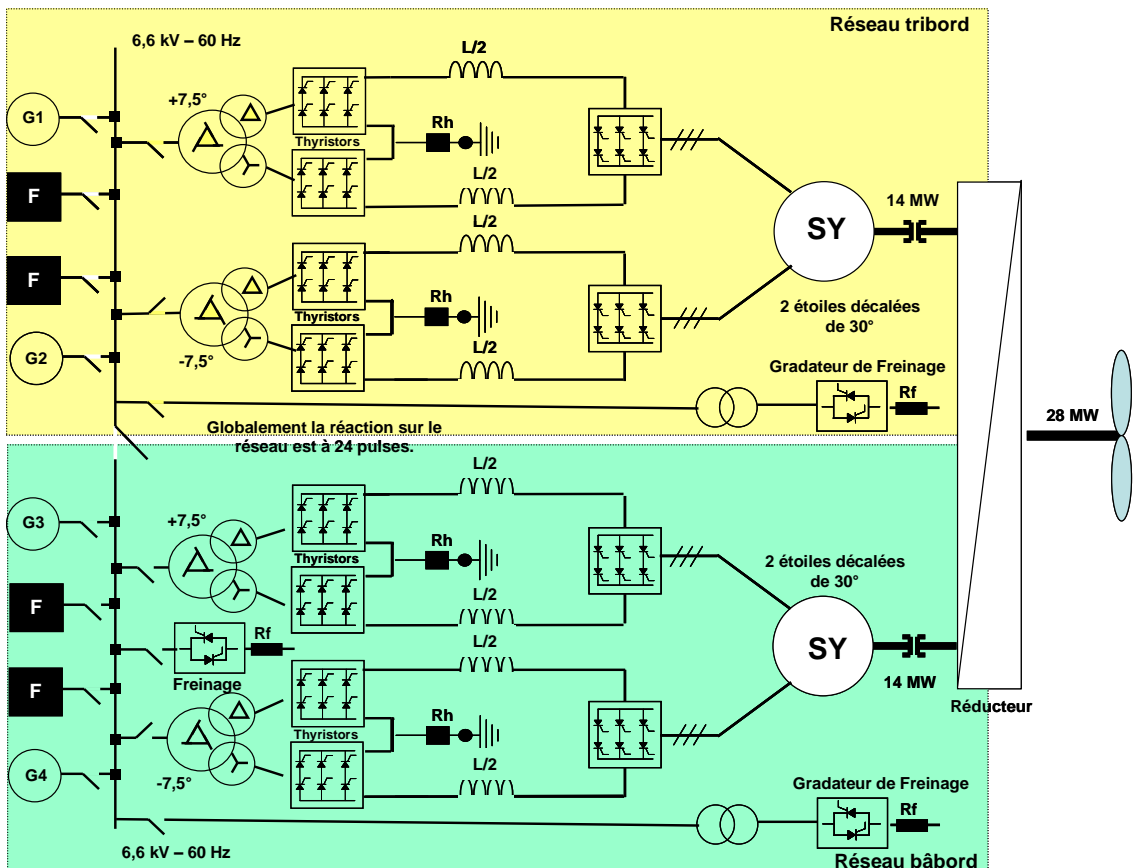


Figure 27 – Comparaison avec la figure 26 d'un convertisseur en source de courant.

Les fonctionnalités de la figure 27 sont les mêmes que celles de la figure 26. En particulier la réaction 24 pulses sur le réseau de bord... Malgré cela des filtres sont disposés sur le réseau ? Du fait des ponts de Graëtz à thyristors, le facteur de puissance est variable voire mauvais quand les moteurs ne sont pas à leur vitesse maximale, une compensation par condensateurs est nécessaire : en fonction de l'exploitation du navire 2 à 3 valeurs de compensation s'imposent. Ces condensateurs sur le réseau engendrent des antirésonances ou résonances parallèles, les fréquences d'accord sont variables avec la puissance court-circuit, c'est-à-dire le nombre des alternateurs qui alimentent le réseau de bord. D'où la présence des filtres dont la fonction est surtout la maîtrise des antirésonances évoquées. Ainsi la structure dodécaphasée des redresseurs est un peu surabondante, en source de courant d'une telle propulsion serait réalisée avec des redresseurs hexaphasés, la réaction sur le réseau serait alors dodécaphasée.

5. Freinage d'un navire.

Le freinage d'un navire est un problème d'architecte naval. Mais le freinage de la ligne d'arbres un problème d'électricien... Lors d'un arrêt d'urgence l'hélice doit battre arrière au vite que possible. Aussi vite que possible, mais en cavitant le moins possible. Dès que le couple de propulsion est annulé, la vitesse de l'hélice prend la vitesse de sillage, elle est variable, en fonction du type de navire, de sa vitesse et de sa masse... C'est ensuite que le freinage commence. Pour un navire donné, les courbes de freinage sont variables (voir courbes de Robinson). Tant que la rotation de la ligne d'arbres n'a pas changé de sens, le freinage continue et se pose le problème de l'énergie de freinage.

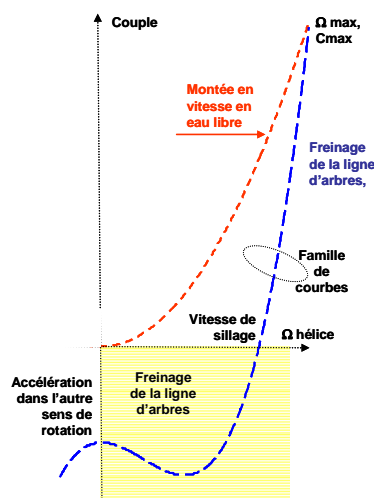


Figure 28 – Freinage

Le convertisseur alternatif / alternatif de la figure 27 étant naturellement réversible, l'énergie de freinage est renvoyée sur le réseau. Si la charge résiduelle du réseau est faible (absence de consommation), sa fréquence augmente, ce qui n'est pas acceptable. On a donc recours à une consommation par résistances, introduite soit avec des contacteurs classiques, soit plus couramment avec des gradateurs à thyristors. Les gradateurs peuvent être contrôlés, a priori, ou en mesurant la consommation des alternateurs du réseau : en fait il suffit de prendre la plus petite des consommations (ET analogique) et de la réguler avec les gradateurs. Ce dispositif conduit à une utilisation optimale des matériels. Ceci suppose de disposer pour chaque alternateur d'une mesure, assez rapide (une ou deux périodes du réseau), de la puissance active.

Le convertisseur alternatif / alternatif de la figure 26, ne permet la réversibilité que pour les convertisseurs machine... Avec des ponts de diodes on ne peut renvoyer l'énergie sur le réseau de bord. C'est donc dans la boucle continue que ce fait la dissipation de l'énergie de freinage, en utilisant des hacheurs sur des résistances. Sans récupération, le freinage aurait pour conséquence des surtensions sur le bus à courant continu. Les hacheurs ont donc pour mission de réguler E_d , en freinage.

Note 10 : Les gros IGBT et les IEGT sont des composants pressés dont la mise en œuvre est délicate. En fait, à l'intérieur du boîtier on trouve une dizaine de composants élémentaires qui doivent être pressés rigoureusement de la même manière. De plus le refroidissement doit être particulièrement homogène, pour que l'ensemble des composants élémentaires soit à la même température, d'où dans bien des cas le recours à des refroidisseurs à grille pour répartir l'eau déionisée de refroidissement. A noter qu'en électronique de puissance on préfère souvent les composants pressés dont on connaît l'état défaillant (court-circuit). Avec un module, autre technologie, l'état défaillant est incertain, ouverture ou court-circuit...

6. Solutions exceptionnelles

La figure 29 représente un convertisseur « universel » il est totalement et très rapidement réversible en puissance active et en puissance réactive. La solution dite back to back peut être réalisées avec des deux niveaux, des quatre niveaux ou des trois niveaux comme ci-dessous.

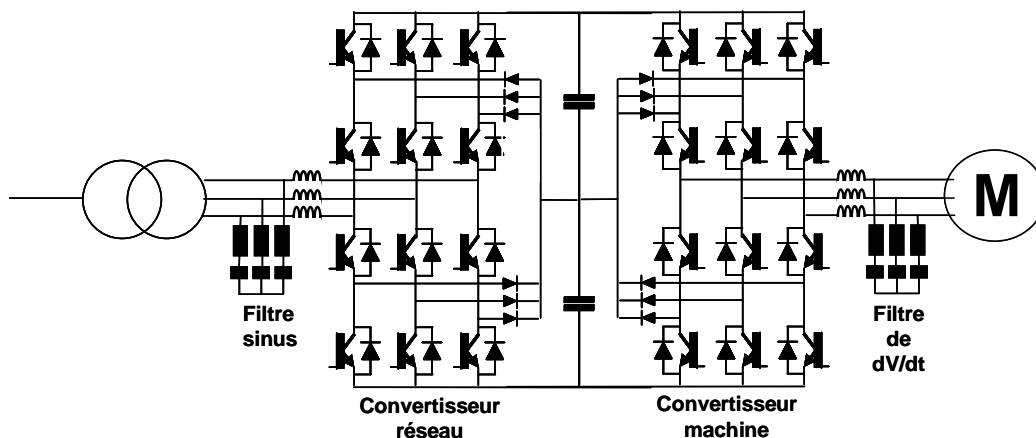


Figure 29 – Convertisseur, dit “back to back”.

Le contrôle d'un moteur synchrone ou asynchrone par un NPC est bien connu, les différentes solutions de contrôle vectoriel, DTC... sont largement répandues dans la littérature [4], [5], [6]. Pour ce qui est du contrôle du réseau, on peut dériver du contrôle des machines, on peut aussi remarquer simplement que la puissance active est contrôlée par l'écart de phase entre la tension réseau et le fondamental de la tension modulée. Quant à la puissance réactive elle est fonction de la différence d'amplitude entre la tension réseau et le fondamental de la tension modulée. Bien entendu le réglage de la tension E_d , dans la boucle continue, passe par le contrôle de la puissance active.

La figure 29 met en évidence, à l'entrée et à la sortie, deux filtres ayant les mêmes structures. Le filtre de dV/dt en sortie est assez léger, il ne doit pas perturber la dynamique de contrôle. Le filtre d'entrée a pour mission d'éliminer les harmoniques de découpage pour le pas perturber le réseau, il est dit « sinus ». Ainsi la structure est la même, mais les valeurs sont différentes. Notons que ce filtre sinus est d'autant plus facile à mettre en place que la fréquence de découpage est élevée : avec un NPC elle est double... Ce filtre du deuxième ordre amorti, coupe entre 400 et 500 Hz pour un découpage à 2000 Hz (1000 Hz x 2, effet NPC).

Ce convertisseur présente bien des avantages, sauf celui du coût... Il est peu utilisé dans les systèmes de propulsion. Son intérêt pourrait éventuellement venir de contraintes sur le réseau : un besoin de stabilisation par modulation d'une certaine puissance réactive (fonction SVC).

A la fin des années 90, au dessus de 10 MW les alimentations en courant étaient incontournables. Pour les navires à vocation scientifique, qui avaient des contraintes de silence, il n'y avait pas beaucoup de

solutions. La Division des Entraînements Industriels d'Alstom à Belfort (aujourd'hui General Electric) a imaginé un filtrage actif du courant d'un redresseur / onduleur pour répondre à un cahier des charges. La figure 30 donne le schéma de principe de cette réalisation (Electric Machine Control System Including a Torque Smoothing Device. Brevet 766,463 Dec.12, 1996).

Le besoin de silence n'est généralement pas requis aux grandes vitesses, mais à des vitesses faibles ou moyennes. Donc les filtres actifs de la figure 30 ne doivent pas être dimensionnés pour la puissance maximale de la machine synchrone (tension et courant).

Le dimensionnement du filtre actif est lié à la vitesse de rotation de l'hélice (figure 31). En effet, le couple d'une hélice est de la forme $C = k \cdot \Omega^2$ ou $C = C_n \cdot (\Omega/\Omega_n)^2$, les tensions sont proportionnelles à la vitesse Ω .

On peut aussi dire que $I_d = I_{dn} \cdot (\Omega/\Omega_n)^2$, l'amplitude des courants dans les phases et dans le filtre subissent la même loi. En se limitant à $\Omega/\Omega_n = 0,6$ le courant maximal dans le filtre est de 20 % de I_{dn} (valeur efficace 10% de I_{dn}). En limitant la vitesse dite silencieuse à 60 % on arrive à un dimensionnement faible du « composant » filtre actif de l'ordre de 12% du convertisseur principal (figure 31).

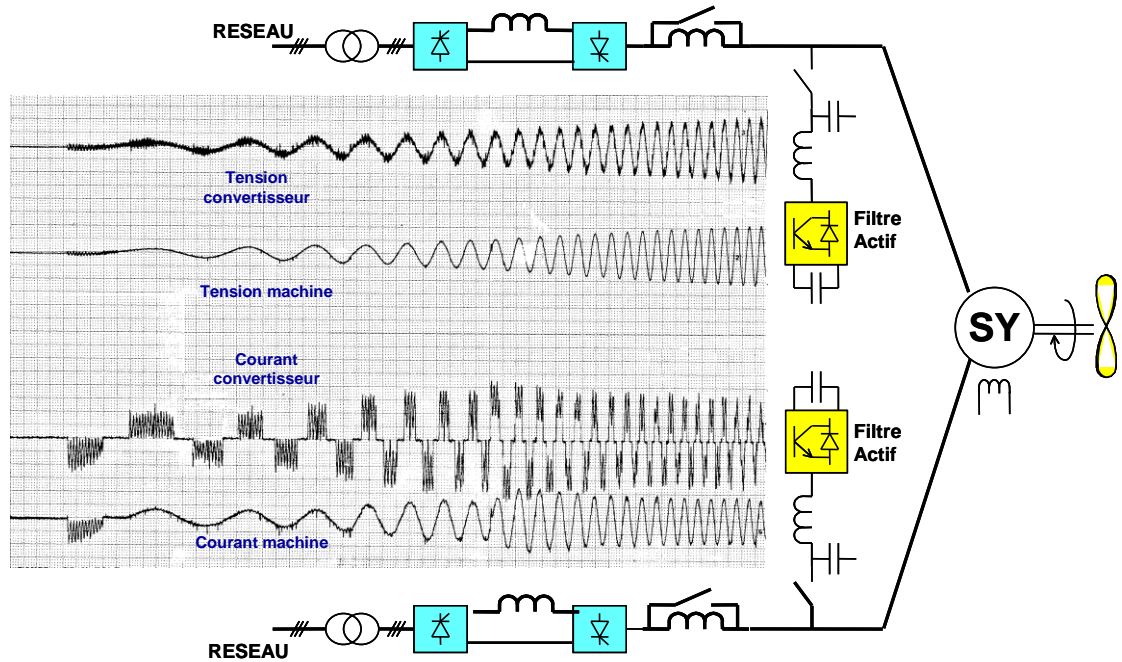


Figure 30 – Lissage actif des courants d'une machine. Enregistrements réalisés en plate-forme à Belfort.

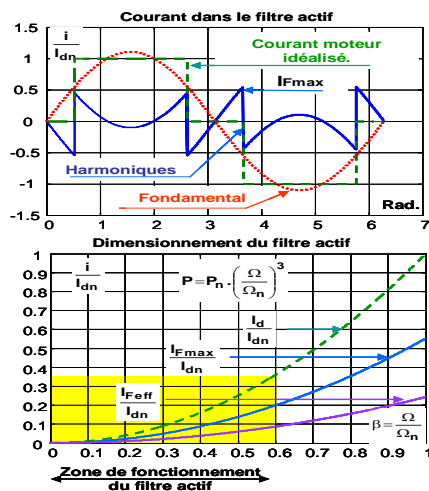


Figure 31 – Dimensionnement.

Aujourd'hui une telle solution a perdu de son intérêt puisque les alimentations en tension (IEGT) sont possibles jusqu'à 15 ou 16 MW

7. Conclusions.

Bien d'autres systèmes de propulsions existent, des propulsions combinées, électrique et turbine à gaz, voire alternateurs attelés qui associent une propulsion classique à une source d'énergie pour le réseau de bord, qui peut devenir une propulsion de secours... Il existe aussi des propulsions réalisées en partant d'un réseau continu, c'est le cas des sous-marins classiques. Nous nous sommes limités à exposer les solutions modernes et classiques mises en œuvre sur les paquebots ou

navires de charge comme les méthaniers... Les aspects liés aux contrôles n'ont pas été abordés, leur seule particularité est d'être assez lents, pour éviter d'exciter des fréquences propres des lignes d'arbres, d'autant que les phénomènes de cavitation des hélices nécessitent des variations lentes de la vitesse.

8. Bibliographie

- [1] - Les convertisseurs de l'électronique de puissance- La conversion alternatif, alternatif- C. ROMBAUT, G.SEGUIER – Lavoisier TEC DOC 1991.
- [2] - Onduleurs de tension- H.FOCH, F.FOREST, T.MEYNARD. Technique de l'Ingénieur D3176
- [3] - Multi-Level- Frequenzumrichter – Spannungszwischenkreis- Umrichter für industrianwendungen- J.COURAULT – HANOVER 2000.
- [4] - Modélisation et commande de la machine asynchrone – J.P.CARON, J.P.HAUTIER - Editions Technip 1995.
- [5] - Modélisation, contrôle vectoriel et DTC – C.CANUDAS DE VIT - Hermes Science – 2000.
- [6] - Sensorless vector and direct torque control – P. VAS – Oxford science publications 1998.
- [7] - Commande et régulation des laminoirs- J.COURAULT. Technique de l'Ingénieur D5345.
- [8] - Circulating Type Motor Bearing Current in Inverter Drives- S.CHEN, T.A .LIPO - IEEE Industry Applications Magazine 1998.

Différentes Stratégies de pilotages pour Véhicule Electrique

Optimisation : puissance moteur, énergie véhicule, temps...

A.SIVERT¹, F.BETIN¹, B.VACOSSIN¹, J.AUBRY², T.LEQUEU³

(1) Laboratoire des Technologies Innovantes (L.T.I), équipe Énergie Électrique et Systèmes Associés (EESA) U.P.J.V Université de Picardie Jules Verne, Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII, 02880 SOISSONS.

(2) ESTACA'LAB, Pôle S2ET « Systèmes et énergie embarqués pour les transports », ESTACA 53061 LAVAL

(3) Association e-Kart - 152 rue de Grandmont - 37550 SAINT AVERTIN, Université TOURS

Résumé : *une multitude de stratégies est possible pour commander un vélo électrique, notamment grâce à la possibilité de récupération d'énergie lors des phases de freinage. Sur un trajet donné, cet article va présenter plusieurs stratégies pour minimiser un ou plusieurs critères tels que : le temps de parcours, la fatigue due au pédalage, l'énergie stockée dans la batterie, la puissance du moteur, les pertes électriques et les échauffements... En fonction de ces stratégies, les performances, l'efficacité énergétique et le dimensionnement des composants du vélo électrique peuvent être déterminés. En effet, chaque stratégie nécessite des limites de puissance et des valeurs de capacité énergétique de la batterie différentes. Ces stratégies peuvent être calculées via une application sur smartphone et basée sur un algorithme connaissant le trajet à effectuer et pouvant directement piloter le variateur du vélo. Mais quels sont les critères à minimiser pour définir un trajet ? Comment les applications proposent-elle un parcours ? Quelles sont les incertitudes de ces applications sur l'énergie consommée ? Comment l'application connaît-elle la puissance de pédalage ? Comment l'application peut-elle connaître les paramètres du véhicule et ses pertes, son besoin en énergie, son autonomie ? Cet article permet de répondre à ces questions pour mieux comprendre les besoins d'un véhicule électrique et sa consommation.*

1. Introduction

Le vélo électrique permet de niveler la puissance humaine de pédalage lors des dénivelés positifs et de récupérer l'énergie dans les descentes. Un trajet donné peut donc être optimisé pour avoir soit :

- un temps de parcours minimum ;
- une énergie à fournir minimale (électrique et humaine) ;
- une puissance nominale moteur la plus faible,
- des pertes électriques limitées pour ne pas dépasser la température maximale du moteur et des convertisseurs électroniques de puissance...

Un compromis de tous ces critères peut être atteint en pondérant plus ou moins ces stratégies en fonction des objectifs que l'on souhaite se fixer. A partir de services en ligne, comme Google Maps par exemple, qui permettent de définir le trajet et de connaître les dénivelés, le trafic, la vitesse maximale pour chaque portion du parcours, des applications et des systèmes pilotent et estiment le temps du parcours et la consommation énergétique... Mais ces nombreuses stratégies dépendent aussi du type d'hybridation et du rendement des motorisations. Par conséquent, une rapide présentation de deux solutions d'hybridation d'un vélo électrique sera présentée ainsi qu'un modèle des puissances mécaniques mises en jeu, ce qui permettra alors d'effectuer une comparaison de

différentes stratégies et d'aborder l'incertitude des estimations.

2. Hybridation d'un vélo électrique

Une hybridation série ou parallèle peut être réalisée sur un vélo électrique.

Pour l'hybridation série [7], le pédalier est remplacé par un alternateur (type 200 W à 80 tr/min) qui charge un élément de stockage de l'énergie. La puissance de charge de la batterie peut être modulée en fonction de la puissance humaine : le cycliste peut alors régler la puissance qu'il veut fournir entre 40 W à 200 W. L'énergie stockée dans la batterie fournit est transférée au moteur via un convertisseur électronique de puissance. Cette hybridation permet éventuellement de recharger la batterie même à l'arrêt si le vélo est un tricycle. L'alternateur, qui doit être conçu pour présenter un bon rendement, permet de simplifier la transmission de la puissance humaine : il n'y a plus besoin de la chaîne mécanique.

L'hybridation parallèle est la plus courante. Elle permet d'additionner la puissance d'une motorisation électrique à la puissance humaine fournie via un pédalier, un braquet et une chaîne. Cette chaîne a une consommation d'environ 10W qu'il faudra retirer de la puissance de la motorisation. L'avantage de cette hybridation parallèle par rapport à l'hybridation série est de pouvoir rouler même s'il y a un problème électrique (problème de moteur ou de convertisseur

défectueux). De plus, cette solution d'hybridation est moins lourde (alternateur en moins).

Les cycles électriques de l'I.U.T. de Soissons ont une poignée délivrant une consigne pour l'asservissement de vitesse qui prend en compte une limitation du courant de la batterie 72V à 40A, donc une limitation la puissance moteur à 3kW et une limitation du courant moteur à 80A. En revanche, le freinage électrique est imposé grâce à un asservissement du couple avec la même poignée de commande dès que l'on effleure le frein mécanique constitué d'un contact poussoir. Par conséquent, il est très facile de vérifier les stratégies proposées.

Mais quelle puissance mécanique doit fournir la motorisation ? Quelle est la valeur de la puissance humaine qui peut être mise œuvre ?

3. Puissance mécanique et consommation

La puissance mécanique résistive d'un cycle électrique est souvent modélisée par l'équation (1) suivante [1][2] :

$$P_{résistance}(W) = k_{aero} \cdot Vit^3 + k_{roul} \cdot Vit + pente \cdot \frac{M \cdot g \cdot Vit(km/h)}{3,6}$$

Avec M, la masse du véhicule et de son conducteur, g l'accélération de la pesanteur, k_{roul} le coefficient de roulement des pneus [3] et k_{aero} le coefficient d'aérodynamisme L'ensemble de ces paramètres est facilement identifiable.

Pour bien appréhender les stratégies, un VTC relativement chargé sera pris en considération.

k_{aero} W/(km/h) ³	k_{roul} W/(km/h)	Masse chassis	Masse elect	Masse Cycliste+bagage
0,0065	7 à 4	20 kg	10 kg	80 kg+30 kg

Tableau 1 : coefficient d'un VTC électrique

Pour bien comprendre les différentes stratégies, un profil de dénivelé simpliste sera choisi avec 5 portions de pentes différentes valant respectivement 0%, 10%, -10%, 5% et -5% et correspondant à la figure 1.

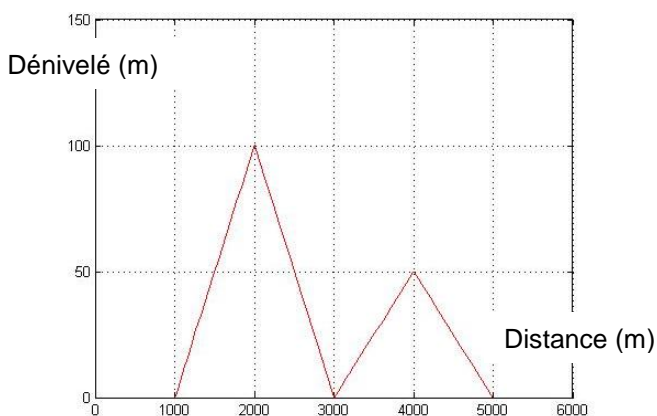


fig 1: trajet de 6 km avec différentes pentes.

Pour une personne adulte en bonne santé, la puissance motrice soutenable est environ de 100 W pendant 6 heures avec un rendement de 20 à 25%. La

puissance peut atteindre 200W pendant 1 heure, voire 300W pendant 10 minutes et 750 W pendant 5 secondes. Pour un sportif de haut niveau, la puissance peut atteindre 350 W pendant 5 h. L'énergie journalière issue de l'activité physique humaine doit être d'environ 1000 Wh à 2000 Wh et peut atteindre 5000 Wh dans des cas extrêmes. Avec une limitation de la puissance électrique du vélo précédent à 250 W et en fonction de la puissance humaine proposée ci-dessus, **quelle sera le profil de vitesse possible en fonction du dénivelé ? Quelle sera la durée du trajet ainsi que la dépense énergétique ?**

4. Stratégie de la puissance moteur constante

Avec des choix arbitraires de 250W pour la puissance maximale du moteur électrique et de 100W pour la puissance humaine, la vitesse en régime établi dépend de la résolution de l'équation (1) correspondant à l'expression (2) suivante :

$$Vit(km/h) = A^{1/3} \cdot \frac{kl(pente)}{3 \cdot k_{aero} \cdot A^{1/3}} \quad (2)$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} kl(pente) = k_{roul} + \frac{M \cdot g}{3,6} \cdot pente \\ A = \frac{P_{mot}}{k_{aero}} + \frac{\left(3 \cdot (4 \cdot kl^3 + 27 \cdot P_{mot}^2 \cdot k_{aero}) \right)^{1/2}}{18 \cdot k_{aero}^{3/2}} \end{array} \right.$$

P_{mot} correspond aux puissances motrices humaine et électrique. Sur la figure 2, on peut observer les dynamiques de la vitesse en simulation. La vitesse sera de 8 km/h pour une pente de 10%, de 14 km/h pour une pente de 5% et de 32 km/h sur du plat.

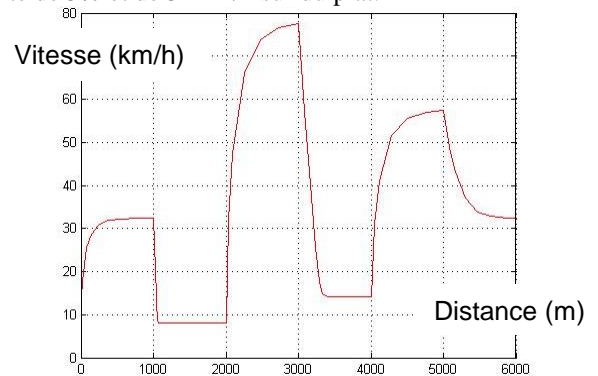


fig 2: vitesse en fonction de la pente et de la distance pour une puissance de 350 W

Le temps pour faire ce trajet de 6 km est de 980 s. La vitesse moyenne est donc de 22 km/h avec une vitesse maximale de 77 km/h alors que le guidonnage intervient à partir de 60 km/h. Par conséquent, cette vitesse maximale est inappropriée. De plus, une vitesse trop faible en dessous de 30 km/h est dangereuse à cause de la différence de vitesse avec les autres usagers de la route (voitures, camions...). Avec une puissance de 250 W + 100 W, l'énergie totale consommée pour effectuer ce trajet correspond à l'équation (3) suivante :

$$E(W \cdot h) = P_{mot,moy} \cdot \frac{t}{3600} = 350 \cdot \frac{980}{3600} = 95 \text{ W.h} \quad (3)$$

Donc l'énergie au km pour le trajet est de 15,8 Wh/km avec 27 Wh d'énergie humaine.

Les valeurs d'énergie fournie par le moteur électrique et humaine évoluent linéairement par rapport au temps puisqu'elles sont constantes. En revanche, représentées en fonction de la distance parcourue, les courbes de consommation d'énergie comportent des pentes différentes. Cela est dû au fait que la vitesse n'est pas constante. L'énergie moteur est donnée via les équations (4) et (5) suivantes avec Δd correspondant à la discrétisation de la distance (50 m avec Google Maps), Δz l'altitude et V la vitesse en m/s :

$$E_{\text{moteur+humaine}} = E_{\text{cinétique}} + E_{\text{aérodynamique}} + E_{\text{roulement}} + E_{\text{potentielle}}$$

$$P_{\text{mot}} \cdot \frac{\Delta d}{\Delta V} = \frac{1}{2} M V^2 + k_{\text{aero}} \cdot 3,6^2 V^2 \Delta d + k_{\text{roul}} \cdot 3,6 V \cdot \Delta d + M g \Delta z$$

Pour obtenir un bilan rigoureux, il est préférable de raisonner sous forme énergétique avec une discrétisation de la distance et donc du trajet et non de raisonner en fonction du temps. Les différentes énergies demandées par le véhicule en fonction de la distance sont observables sur la figure 3 suivante.

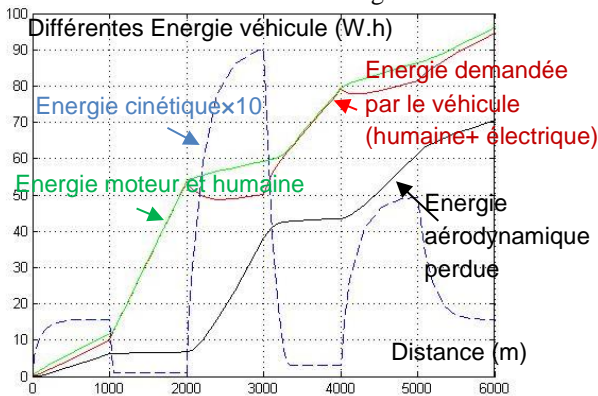


fig 3: différentes énergies pour une puissance constante de 350 W.

Sur la figure précédente, les pertes aérodynamiques qui fluctuent en fonction de la vitesse sont relativement importantes. D'ailleurs, pour minimiser la consommation énergétique du véhicule, une expérimentation à vitesse constante est évidente.

Stratégie de la vitesse constante ou de la minimisation de l'énergie

Pour faire une comparaison avec la commande précédente, la même vitesse moyenne de 22 km/h sera choisie. On peut observer sur la figure 4 que la puissance du moteur varie fortement avec un freinage électrique lors des descentes grâce au variateur qui régule la vitesse.

L'énergie totale est de 42,5 Wh avec la même énergie humaine que dans le cas précédent. La puissance moyenne est seulement de 157 W avec une puissance électrique de 57 W correspondant à la puissance résistive à 22 km/h (1). L'énergie demandée par le véhicule est seulement de 7 Wh/km. En effet, l'énergie potentielle lors des montées est restituée lors des descentes. Par conséquent, une commande à vitesse constante minimise la consommation d'énergie [7],

mais demande une puissance plus importante au moteur. Sur la figure 4, on peut observer un écart de puissance de pédalage de 100W correspondant à la différence entre la puissance du véhicule et la puissance moteur électrique.

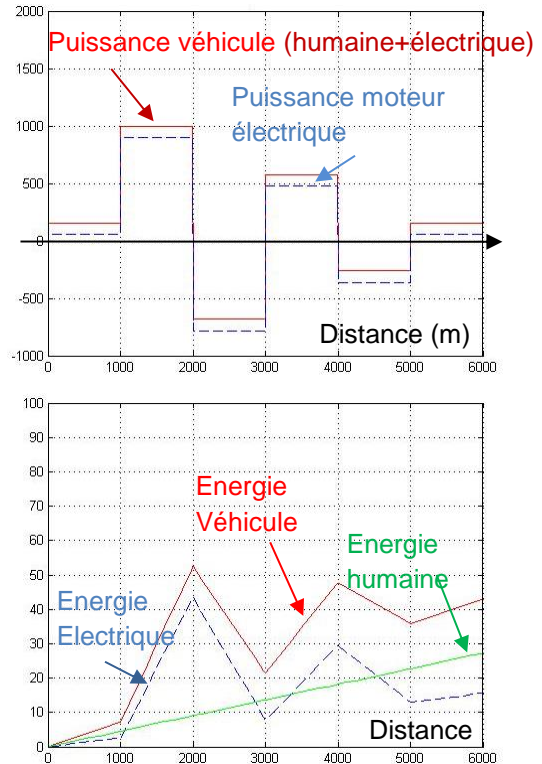


Fig 4 : Puissance en W et énergie en W.h en fonction de la distance en m, pour une vitesse de 22 km/h constante.

Il y a donc un compromis à établir entre le temps de trajet et la consommation d'énergie.

5. Stratégie du temps minimal avec vitesse imposée en montée et descente.

Une vitesse constante de 35 km/h correspond à une vitesse d'usage correcte pour un cyclotouriste aussi bien sur le plat qu'en montée. Notons que pour rouler en toute sécurité dans les descentes, la vitesse sera alors limitée à 50 km/h.

Dans ce cas, la puissance et l'énergie en fonction de la distance correspondront aux graphes de la figure 5. La puissance lors des montées est plus grande que dans le cas précédent. Il en est de même pour la puissance de freinage présentée pour la pente à -10%. En effet, la puissance de freinage est nécessaire moins longtemps puisque la vitesse en descente est de 50 km/h. En revanche, ce n'est pas le cas pour la pente de -5%. Il faut 555 s pour effectuer le parcours de 6 km avec une vitesse moyenne de 39 km/h, une énergie totale de 88 Wh, dont 15 Wh d'énergie humaine, et une puissance moyenne totale de 570 W dont toujours 100 W d'origine humaine. L'énergie nécessaire pour le véhicule est alors de 14,6Wh/km.

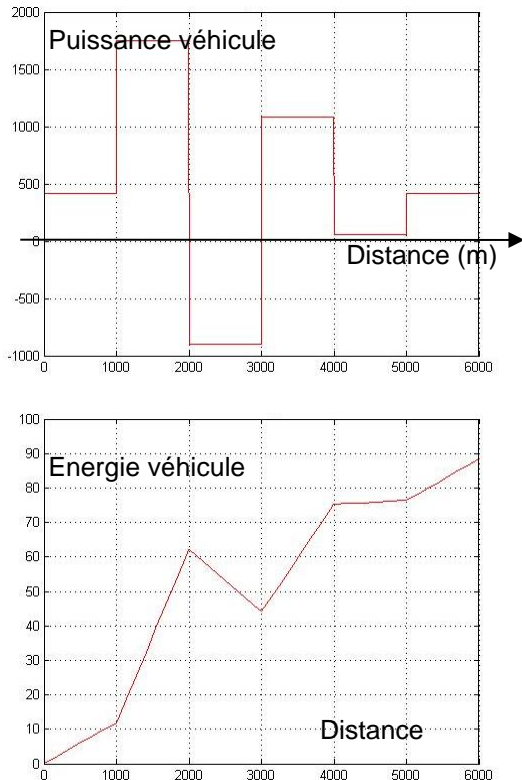


fig 5 : Puissance en W et énergie en Wh en fonction de la distance en m, pour un temps minimal avec limitation de la vitesse.

Si l'on réduit le temps de trajet, la consommation d'énergie humaine est plus faible, ce qui engendre moins de fatigue. Par conséquent, en vélo électrique, les distances parcourues peuvent être beaucoup plus longues que celle effectuées avec un vélo traditionnel. Cependant, dans ce cas, il faut une batterie de capacité énergétique suffisante.

Une autre stratégie peut être étudiée. C'est celle pour laquelle il n'y a pas besoin d'énergie extérieure. C'est-à-dire que l'énergie est entièrement fournie par le cycliste et la puissance est nivelée par la motorisation électrique.

6. Stratégie sans énergie extérieure (vélo électrique autonome).

Cette stratégie permet de ne pas recharger la batterie sur une prise extérieure, toute l'énergie provenant de la puissance humaine de pédalage [7]. En revanche, la motorisation électrique nivelle la puissance. Sachant que les énergies aérodynamiques et de résistance de roulement correspondent à l'énergie humaine fournie, la vitesse moyenne est déterminée par l'équation 2 pour une puissance humaine de 100 W et donne une valeur de vitesse de 17km/h. Donc, le temps pour effectuer le parcours est de 1270 s avec une énergie correspondant à l'équation (6) suivante :

$$E_{\text{trajet}}(\text{W.h}) = P_{\text{humain moy}} \cdot \frac{t}{3600} = 100 \cdot \frac{1270}{3600} = 35 \text{ W.h}$$

La consommation du véhicule passe à 5,83 Wh/km. La batterie doit être dimensionnée en fonction de l'énergie potentielle relative à la plus grande montée. Pour le profil du dénivelé précédent, la capacité énergétique devra correspondre à l'énergie potentielle suivante (7) :

$$E_{\text{batterie}}(\text{W.h}) = Mg \cdot \Delta z / 3600 = 140 \cdot 9,8 \cdot 100 \text{ m} / 3600 = 39 \text{ W.h}$$

Les courbes suivantes (figure 6) de la puissance et de l'énergie correspondent à cette dernière stratégie. On peut observer que sur le plat de 0 à 1000 m, la puissance est bien de 100 W. Cependant, il faut toujours des puissances motrices et de freinage relativement importantes. La figure 6 montre aussi l'évolution de l'énergie demandée par le véhicule et de l'énergie du pédalage en fonction de la distance parcourue.

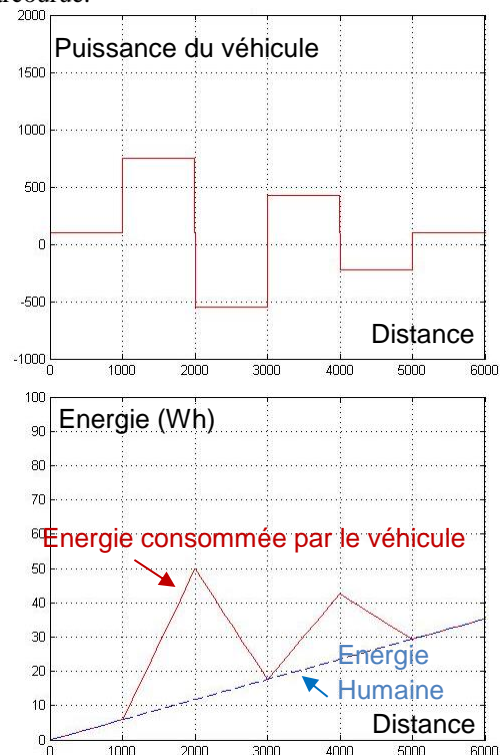


fig 6 : Puissance en W et énergie en Wh en fonction de la distance en m, pour une vitesse donnée avec une stratégie de non utilisation d'énergie extérieure.

Evidemment, si la puissance humaine est plus importante, la vitesse moyenne pourra être plus grande. L'avantage du vélo électrique est de pouvoir effectuer un trajet à effort constant.

Mais comment l'outil Google Maps détermine le chemin à prendre pour un trajet donné ? Est-ce que l'application prend en compte le dénivelé pour proposer un parcours ? Quels sont les traitements dynamiques réalisés permettant de définir un trajet ?

7. Algorithme dynamique de proposition de trajet

Google Maps API [8] permet de savoir comment sont calculées les distances et les durées des trajets entre différents points. Mais l'application ne prend pas en compte l'élévation pour proposer un itinéraire et ne donne pas une estimation de la consommation comme l'application *viamichelin.fr*. Il existe plusieurs algorithmes pour définir un trajet, mais le plus connu est celui de Bellman [9] : le problème est de trouver la distance la plus courte entre plusieurs points GPS.

L'algorithme de Bellman peut être utilisé en temps réel pour une distance donnée et permet de calculer la puissance nécessaire afin de minimiser la consommation d'énergie [10]. Avec la stratégie de la vitesse moyenne, l'élévation a peu d'importance. Par contre, pour la stratégie du temps minimum, le dénivelé aura une grande importance et de grandes conséquences sur l'autonomie.

Évidemment, l'algorithme de proposition de trajet se complique si l'on prend en compte la stratégie de pilotage, le trafic, la minimisation de consommation d'énergie, la minimisation du temps de trajet et le rendement de la motorisation pour proposer un trajet. **Mais d'ailleurs, quel est l'impact du rendement de la motorisation sur la stratégie de pilotage ?**

8. Relation entre le rendement de la motorisation et la stratégie de pilotage.

Dans les quatre stratégies précédentes, le rendement du moteur n'a pas été pris en compte.

Or, le rendement d'un moteur roue de vélo en fonction de la vitesse correspond à la figure 7.

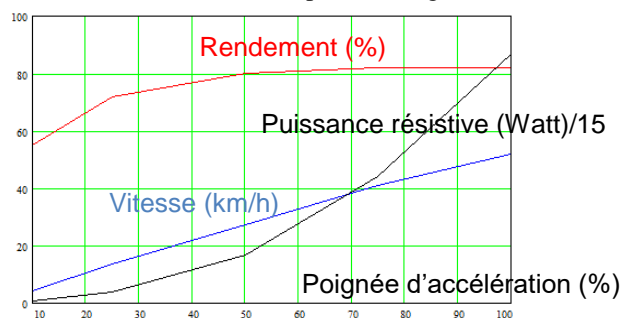


fig 7 : caractéristiques du moteur HS3540 en fonction de la poignée d'accélération avec une pente de 0% en 72V [11]

On peut observer que le rendement est pratiquement constant sauf pour les basses vitesses. En effet, il n'y a pas de boîte de vitesses entre le moteur roue et la roue arrière du vélo soumise à la puissance résistive. Enfin, il y a des courants importants et donc des pertes plus importantes dans le moteur lorsque celui-ci tourne à basse vitesse.

Pour ne pas avoir d'échauffement important de la motorisation, la stratégie d'un pilotage minimisant le temps de parcours, avec des vitesses au-delà de 35 km/h pour avoir une meilleure dissipation, est la plus intéressante.

Il y a une optimisation de la consommation énergétique due au rendement à partir d'une certaine vitesse. Ceci a d'ailleurs déjà été démontré dans cette publication [6]. De plus, le rendement de l'énergie humaine est compris entre 20 et 25%. Par conséquent, la stratégie de la minimisation du temps du trajet est la plus intéressante pour minimiser l'énergie d'origine humaine dépensée.

Notons que, naturellement, pour rester en bonne santé, un minimum d'énergie musculaire doit être dépensé au quotidien.

9. Instrumentation des vélos électriques et estimateurs de consommation d'énergie.

L'objectif des estimateurs est de déterminer l'autonomie restante qu'il est possible d'obtenir par rapport à la capacité énergétique de la batterie tout en prenant en compte l'énergie de pédalage.

De nombreux GPS et applications de smartphones pour vélo proposent des estimateurs de kilocalories. Certaines applications proposent l'enregistrement des données sur fichier au format .CSV et affichent les courbes de vitesse, d'énergie, de puissance, les pulsations cardiaques, le tout en fonction de la distance. On peut citer les applications :

- « Mes parcours »
- « Openrunner »

Pour les vélos électriques, il existe des estimateurs gratuits de consommation en ligne pour *smartphone*. Citons ici :

- <https://www.ebikemaps.com/>
- <http://www.ebikes.ca/tools/trip-analyzer.html>

Ces estimateurs permettent de supputer la puissance de la motorisation, la température du moteur, l'énergie consommée en fonction d'un itinéraire que l'on a défini sur *Google Maps*.

Depuis 2013, pour environ 180 €, l'instrumentation « *cycle analyst* », que l'on peut installer sur tout véhicule électrique, permet de faire une mesure de la consommation à 1% près. De plus, cette instrumentation permet depuis 2015, de mettre un capteur de pédalier pour mesurer la vitesse, le couple et donc la puissance de pédalage. En revanche, cette application n'inclut pas de fonction GPS. Il faut donc l'associer à un *smartphone* pour générer le dénivelé positif et négatif. Les données sont sauvegardées et permettent de faire une analyse du périple ainsi que des comparaisons avec un estimateur en ligne.

En général, l'instrumentation des vélos électriques n'est précise qu'à 20% près, ce qui n'est pas satisfaisant pour faire une étude et rassurer le cycliste sur un parcours (exemple : console *Intuvia* du fabricant *Bosch*, 95 €). En 2016, cette même marque a développé une console avec GPS appelée *Nyon* (360 €) permettant une estimation de consommation en ligne. Cependant, ce GPS estimateur n'est compatible qu'avec le moteur pédalier de la même marque et ne peut qu'être adapté à un vélo droit. Ces estimateurs en ligne ne connaissent pas en général la puissance de pédalage, ni les coefficients de roulement et d'aérodynamisme du cycle. Par conséquent, il y a un décalage important

entre l'estimation et la réalité. Seule l'estimation proposée par *Ebikemaps* est adaptative, c'est-à-dire qu'à chaque trajet, on peut lui indiquer la valeur de la consommation ce qui permet d'ajuster les paramètres du véhicule. Il faut donc une instrumentation précise (à 1% si possible / Ex : *cycle analyst*, 150€) de la consommation électrique, du dénivelé positif et négatif, de la distance et de la vitesse moyenne pour obtenir des résultats corrects. De plus, à partir de l'équation (5) de l'énergie discrétisée en fonction de la distance, avec la stratégie qui minimise la consommation d'énergie électrique en utilisant le freinage électrique, l'énergie électrique correspondra à l'équation (8) suivante :

$$E(W.h) = \left(\frac{P_{résistive}(V_{moy})}{\eta_m} - P_{humain} \right) \cdot \frac{Dist}{V_{moy}} + \left[\frac{Mg}{3600} \cdot \frac{D^+}{\eta_m} - D^- \cdot \eta_m \right] \quad (8)$$

Avec D^+ la somme des dénivelés positifs et D^- la somme des dénivelés négatifs en mètres.

Exemple : pour le parcours étudié et un rendement moteur considéré comme constant à 80%, on peut observer que l'énergie perdue dans le moteur est loin d'être négligeable (9).

$$E_{Elec} = \frac{E_{veh} - E_{humain}}{\eta_m} + E_{dénivelé D^+} - E_{récupérée D^-} \quad (9)$$

$$E_{Elec} = \frac{157 \cdot 100}{0,8} + \frac{6km}{22km/h} + \frac{1409,8}{3600} \cdot \left(\frac{150}{0,8} - 150 \cdot 0,8 \right)$$

$$E_{Elec} = \frac{15,5 W.h}{0,8} + 25,7 W.h = 45,1 W.h$$

On peut observer sur les courbes de la figure 8 cette énergie électrique en prenant en compte le rendement du moteur. A cause de ce rendement, si l'on compare la courbe de puissance suivante à la courbe de la figure 4, on peut observer que la machine électrique demande plus de puissance lorsqu'elle fonctionne moteur. En revanche, la puissance de récupération est plus faible. On peut observer les pertes du moteur électrique et son échauffement en prenant en compte une résistance thermique de 0,29°K/W et une constante de temps de 18 min. Si la montée dure trop longtemps (13 km à 22 km/h) alors le régime établi de température sera presque atteint. Or, la température du bobinage ne doit pas dépasser 90°C. Dans ce cas, l'instrumentation proposée par la solution « *cycle analyst* » limite la puissance du moteur pour réduire les pertes et l'échauffement. Un deuxième capteur de température peut être placé sur le variateur pour le protéger.

Avec la stratégie de minimisation du temps où le freinage électrique est faible, la consommation peut être déterminée approximativement par l'équation (10) suivante :

$$E(W.h) = (P_{résistive}(V_{moy}) - P_{humain}) \cdot \frac{distance}{V_{moy}} + \frac{Mg \cdot D^+}{3600} \quad (10)$$

Exemple : avec le parcours précédent, en négligeant l'énergie récupérée dans les descentes et avec la vitesse moyenne de 39km/h, on obtient :

$$E = \left(\frac{470}{0,8} - 100 \right) \cdot \frac{6}{39} + \frac{140 \cdot 9,8 \cdot 150m}{3600 \cdot 0,8} = 145 W.h$$

Les pertes de la motorisation étant plus grandes, la différence d'énergie est encore plus significative par rapport à la valeur pour laquelle le rendement est de 100%.

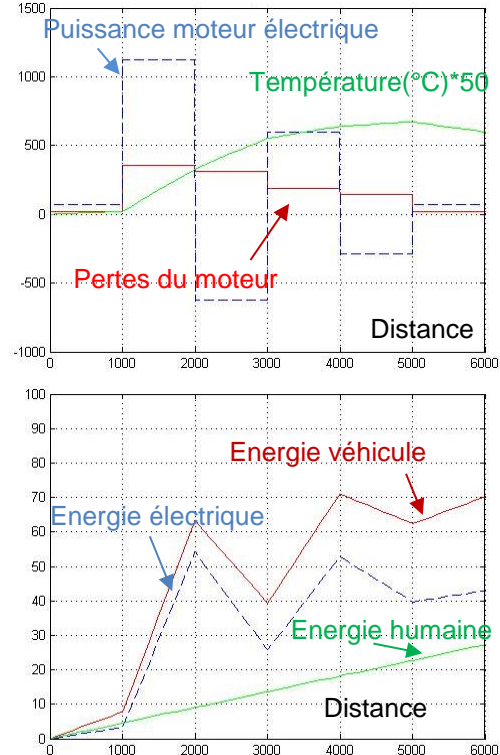


fig 8 : puissances en W et énergies en Wh en fonction de la distance en m, pour une vitesse de 22km/h constante avec un rendement du moteur de 80%.

Dans les 2 équations précédentes, l'énergie cinétique n'a pas été prise en compte.

Peut-on récupérer cette énergie lors des freinages ?

Effectivement, l'énergie cinétique peut être récupérée avec un freinage électrique, mais il faut anticiper le freinage. En effet, le freinage d'urgence demande une puissance très importante que ne pourra pas absorber le moteur.

Exemple : avec un freinage de 5 secondes pour notre véhicule lancé à 35 km/h, la puissance moyenne et maximale est déterminée par l'équation (11) suivante :

$$P_{freinage moy} = \frac{M \cdot v^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot \text{temps}_{frein}} = \frac{140 \cdot 35^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot 5} = 1654 W \quad (11)$$

$$P_{freinage max} = 2 \cdot P_{freinage moy} = 3308 W$$

Par conséquent, il faut en général un temps supérieur à 10 s pour récupérer l'énergie cinétique d'où l'importance d'anticiper le freinage.

Peut-on négliger cette énergie cinétique au regard de la consommation globale d'un véhicule électrique ?

En zone urbaine, le nombre de démarrages n'est pas négligeable. Etant donné que le vélo électrique suit le flot des voitures, l'accélération est effectuée avec le

moteur électrique. En zone urbaine, le nombre d'arrêts est important. Considérons un stop ou un feu de signalisation tous les 500 m, pour le parcours de 6000 m étudié, l'énergie cinétique sera donnée par l'équation (12) suivante :

$$E_{\text{cinétique}} = \frac{M \cdot V^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot \eta_m} (\text{nbr}_{\text{démarrage}} - \text{nbr}_{\text{freinage arrêt}}) \quad (12)$$

$$E_{\text{cinétique}} = \frac{140 \cdot 35^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot 0,8} \left(\frac{6 \text{ km}}{0,5 \text{ km}} - 0 \right) = 27,5 \text{ W.h}$$

Par conséquent, l'énergie cinétique n'est pas négligeable. Or aucune application ne prend en compte la signalisation et l'infrastructure routière.

D'un autre côté, l'utilisateur au quotidien connaît approximativement sa consommation d'énergie en Wh/km et donc peut connaître plus ou moins sa consommation et son autonomie en fonction de sa stratégie de pilotage.

De plus, l'autonomie possible dépend de l'état de santé de la batterie [4]. Or très peu d'applications prennent en compte cet état de santé. Pourtant une perte de la capacité énergétique de 20% de la batterie est à prendre en compte au bout de quelques années d'utilisation du véhicule.

Si l'impact de la stratégie de pilotage joue sur la consommation énergétique, les performances du cycle ont également un impact très significatif.

10. Amélioration des performances du cycle

L'amélioration des performances d'un cycle passe par une diminution de sa masse [1], des coefficients de roulement [3] et d'aérodynamisme.

La diminution de la masse fait appel à l'utilisation de matériaux de haute technologie d'où une forte augmentation du prix et de la fragilité des composants du véhicule. La recherche de l'amélioration du coefficient d'aérodynamisme entraîne l'utilisation d'un carénage dont la masse peut atteindre les 20 kg. Ces cycles prennent alors l'appellation de vélo-mobiles. Il est à noter que ce carénage permet aussi de s'affranchir des mauvaises conditions météorologiques lors d'une utilisation quotidienne. Sur le tableau 2 suivant, on peut remarquer que le coefficient aérodynamique est alors divisé par 5 par rapport à un vélo droit.

K_{aero} W/(km/h) ³	K_{roul} W/(km/h)	Masse châssis	Masse elect	Masse Cycliste+bagage
0,0015	7 à 4	40 kg	10 kg	80 g+10 kg

Tableau 2 : coefficient aérodynamique d'un vélo-mobile électrique

Enfin, le rendement des moto-variateurs électriques peut être amélioré pour passer de 90 à 95% mais avec 2 à 3 kg de masse supplémentaire, du au changement du bobinage moteur. On peut aussi considérer l'augmentation de la tension de la batterie qui permet de minimiser les courants et les pertes électriques.

11. Conclusion

De nombreuses stratégies peuvent être utilisées en vélos électriques selon que l'on veut minimiser l'énergie de la batterie, le temps pour effectuer le trajet, la fatigue humaine...

Les stratégies dépendent des limitations de puissance du moteur, des échauffements du moteur, de l'énergie embarquée par le vélo, de la vitesse qu'il est possible d'atteindre sur la route. D'ailleurs, les pistes cyclables et les voies vertes sont souvent limitées à 25 km/h... avec de nombreuses traversées de routes et donc de nombreux arrêts entraînant des pertes d'énergie cinétique.

L'homme est un excellent stratège, mais il a besoin d'être formé à différents types de pilotage. En effet, l'être humain a souvent des idées reçues qu'il faut corriger telles que : rouler doucement dans les côtes pour moins consommer d'énergie ou limiter la puissance dans les montées, alors que dans ces deux cas l'énergie de la montée égale l'énergie potentielle.

Pour rassurer les utilisateurs sur l'autonomie et le temps de trajet, des fabricants de GPS, de motorisations ou d'applications vendent des systèmes relativement chers et avec une incertitude relativement importante. Pour masquer ces incertitudes, des algorithmes adaptatifs recalculent les estimations en fonction des aléas de la route et du pilotage.

Les algorithmes adaptatifs permettent de connaître assez facilement les performances du cycle à partir des données de puissance et énergie nécessaires en fonction de la distance. En revanche, l'application ne peut pas connaître le temps exact d'un trajet car elle ne sait pas, par exemple, si l'utilisateur est en balade ou s'il se rend sur son lieu de travail, avec un temps souhaité pour ce trajet.

Evidemment, les différentes stratégies présentées peuvent être combinées entre elles grâce à une pondération à effectuer par l'utilisateur.

Cette étude permet aux étudiants de faire un bilan énergétique et de bien comprendre les exigences d'un véhicule électrique. Les simulations permettent de bien comprendre les stratégies et de dimensionner la puissance de la motorisation.

Tous les étudiants peuvent piloter un vélo électrique instrumenté [5] et vérifier ainsi les performances de la stratégie en ayant à l'esprit un ordre de grandeur de la puissance nécessaire et de l'énergie, potentielle ou cinétique, disponible. Ils peuvent aussi comprendre comment l'énergie est estimée par les applications, les GPS et faire la critique des approximations rencontrées. Ils peuvent, enfin, effectuer le traitement des données via un tableur ou un logiciel de modélisation mathématique et donc appréhender les problèmes d'intégrations de dérivation et de filtrage numérique nécessaires pour réaliser un estimateur.

Dans le monde actuel, les différents utilisateurs oublieraient-ils ces maximes philosophiques qui nous rappellent qu'« on part quand on part et qu'on arrive quand on arrive ? » ou « qu'il faut prendre le temps de faire les choses, de découvrir

des paysages et d'explorer de nouveaux sites patrimoniaux ». Faut-il toujours tout planifier ?

Évidemment, les stratégies de pilotages peuvent être appliquées à d'autres véhicules électriques ou hybrides thermiques.

12. Références

A. Sivert, F. Betin, T. Lequeu, B. Vacossin « Optimisation de la masse en fonction de la vitesse, puissance, autonomie, prix, centre de gravité, frein, d'un Véhicule électrique à faible consommation (vélo, vélo-mobilité, voiture électrique) Estimateur de consommation sur un parcours » Revue 3EI N°80, Avril 2015, page 47 à 57 et WSEAS 2015

<http://www.wseas.org/multimedia/journals/education/2015/a225810-158.pdf>

A. Sivert, J. Claudon, F. Betin, B. Vacossin, « Véhicule électrique à faible consommation Problématique mécanique des tricycles carénés caractérisation avec Smartphone » Revue Technologie N°199, octobre 2015, page 26 à 38 et WSEAS 2016

<http://www.wseas.org/multimedia/journals/education/2016/a065810-178.pdf>

A. Sivert, J. Claudon, F. Betin, B. Vacossin, « Étude des pneus pour tricycles » carénés à faible consommation, Revue Technologie N°201, janvier 2016, page 40 à 48

http://eduscol.education.fr/sti/ressources_techniques/revue-technologie-ndeg201-sommaire

A. Sivert, F. Betin, T. Lequeu, B. Vacossin « Etat de santé, diagnostic, durée de vie des batteries Lithium – Application à l'estimation de l'autonomie d'un véhicule électrique » Revue Technologie N°84, Avril 2016

A. Sivert, F. Betin, T. lequeu « Instrumentation d'un véhicule motorisé électrique faible consommation de type « éco marathon » Revue 3EI N°81, Juillet 2015, page 52 à 60

A. Sivert, F. Betin « Gestion et dimensionnement de l'énergie embarquée pour un véhicule électrique à faible consommation » Symposium de Génie électrique SGE 2014

J. AUBRY, I. MILADI « Optimisation de la gestion d'énergie d'un véhicule à propulsion humaine à assistance électrique autonome » SGE 2016

<https://developers.google.com/maps/documentation/distancematrix/intro#Audience>

https://en.wikipedia.org/wiki/Travelling_salesman_problem

J.J. Santin, « The World's Most Fuel efficient Vehicle » book edition V/d/f

<https://books.google.fr/books?id=xKFVvUMpgEcC&printsec=frontcover&dq=google+book+J.J.Santin,+The+Worlds+Most+Fuel+efficient+Vehicle+bool+V/d/f&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwj7kNW4pcrNAhWGPxoKHaBUDgsQ6AEILDAA#v=onepage&q&f=false>

A.Sivert, B.Cauquil, E.Morel, F.BAilly « Véhicules à faible consommation énergétique (Challenge SUNTRIP) » Revue 3EI N°85, Juillet 2016



fig 9 : vélo-mobiles qui peuvent rouler sur la route et monter des pentes de 15% avec 20kg de bagages à côté de prototypes de l'éco marathon 2016



fig 10 : Vélo-mobile électrique monoplace de 50 kg, 3 kW, 250km d'autonomie, 45 km/h de moyenne, à côté d'une

voiture GT de 350 kW. Faut-il un véhicule de 1700 kg pour déplacer un être humain de 80 kg ?



fig 11 : vélo-mobile et vélo-couché électriques pouvant transporter 30 kg de bagages en utilisant des sacs ou une remorque



fig 12 : vélo-mobile de l'IUT de l'Aisne

Réalisation d'un kart électrique : des solutions pour faire évoluer le projet

T. LEQUEU⁽¹⁾, V. DEWANCKER⁽²⁾, S. JACQUES⁽³⁾, A. SIVERT⁽⁴⁾

(1) Université François Rabelais de Tours – 60 rue du Plat d'Étain – 37020 Tours Cedex 1.

(2) Société Kart Masters – 9 rue Saint Denis – 72300 Sablé-sur-Sarthe.

(3) Université François Rabelais de Tours – Polytech Tours – 7 avenue Marcel Dassault – 37200 Tours.

(4) U.P.J.V. Université de Picardie Jules Verne – Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII – 02880 Soissons – Laboratoire des Technologies Innovantes – Equipe Énergie Électrique et Systèmes Associés.

Résumé : Cet article présente quelques exemples de réalisation de véhicules électriques. Les projets présentés peuvent être réalisés par les étudiants dans le cadre de leur formation. On s'intéresse ici aux véhicules « pilotables » par les étudiants (sont exclus les robots, les engins radios commandés et les drones) afin qu'ils soient en prise directe avec leur projet et les notions physiques qu'ils auront étudiées au cours de leur cursus, dans le cadre d'un projet d'électrification d'un véhicule.

Au vue de la taille du véhicule, le budget de réalisation doit être maîtrisé. Grâce au partenariat mis en place par l'Association e-Kart avec la société Kart Masters, il est désormais possible de construire une progression financière du projet sur plusieurs années. Au fil du projet, le véhicule évolue par un échange et un ajout de composants de plus en plus performants.

Cet article détaille un exemple de déroulement sur 6 années de la réalisation d'un kart électrique. Ce projet est donné à titre indicatif et pourra être largement adapté en fonction des contraintes locales.

1. Introduction

L'engouement du public pour les véhicules électriques se retrouve dans nos activités pédagogiques. Depuis quelques années, il est de plus en plus facile de réaliser des véhicules électriques dans le cadre de projet avec les étudiants [1–8].

L'association e-Kart a été créée en 2006 dans l'optique de promouvoir le véhicule électrique comme support pédagogique au sein des établissements scolaires et également aider les personnes qui se lancent dans un projet de construction. La figure 1 présente le site web de l'association e-Kart [9].



Fig. 1. Aperçu du site web de l'association e-Kart en août 2016.

Un des services proposés à la création de l'association était la fourniture de matériels spécifiques (avance des fonds pour les commandes à l'étranger),

mais cet aspect commercial a largement débordé les attributions initiales. Avec l'arrivée en septembre 2013 du partenaire Kart Masters et la création de la boutique en ligne Kart Masters Shop, la gamme de produits disponibles s'est largement étendue (cf. figure 2)[11]. En effet, la société Kart Masters est spécialisée dans la construction de karts électriques. L'ensemble du matériel proposé à la vente sur la boutique est validé et bien adapté à la réalisation des véhicules électriques pédagogiques.

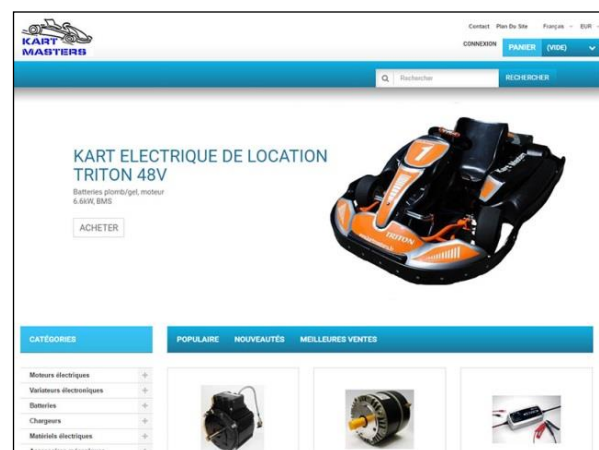


Fig. 2. Aperçu du site web de la Boutique Kart Masters Shop en août 2016 [11].

Les véhicules présentés dans cet article ont la particularité d'être pilotable. En d'autres termes, les étudiants sont en mesure d'apprécier les sensations de couple et de vitesse.

Après avoir fait un bref rappel sur le choix du véhicule et des composants nécessaires à son

électrification, nous proposerons une progression d'un projet de kart électrique sur plusieurs années. Les prix indiqués dans cet article sont TTC et sont donnés à titre indicatifs.

2. Quel type de véhicule ?

Même si le véhicule de prédilection de l'Association e-Kart est le kart électrique, le matériel et les conseils prodigués ici peuvent servir à d'autres applications.

2.1. Véhicules non terrestres

En effet, il n'est pas indispensable d'avoir des roues pour déplacer une personne : c'est le cas par exemple des bateaux, des avions...

2.1.1. Bateau électrique

La réglementation dans les ports oblige les bateaux à manœuvrer à faible vitesse (3 nœuds, soit environ 5,5 km/h) et souvent sans l'aide du moteur diesel principal. Un moteur électrique d'appoint est bien utile. Il est possible de franchir le pas du « tout électrique », notamment avec la progression des batteries Lithium LiFePO4 de grande capacité (supérieure à 100 Ah) qui deviennent abordables (environ 6000 € pour une batterie 48V 400Ah LiFePO4 avec son électronique de surveillance) et permettent des autonomies importantes (plusieurs heures).

2.1.2. ULM électrique

Avec du matériel de « pointe » digne du « gros » aéromodélisme, il est possible de propulser un ULM à partir d'un moteur électrique (cf. figures 3 et 4). Afin de limiter la masse de la batterie, l'utilisation de cellules Lithium ions de dernière génération est alors indispensable et le budget s'en trouve alourdi (le coût des batteries Lithium ions est environ le double de celui des batteries Lithium LiFePO4).



Fig. 3. Thomas JORON aux commandes d'un ULM électrique réalisé en partenariat avec l'IUT de Chartres [12].



Fig. 4. Propulseur électrique pour parapente développé par Stéphane LELONG [13].

2.1.3. Treuil électrique

Voici une autre application originale de la traction électrique : le treuil pour la pratique de sport nautique de glisse. Un des objectifs de cette réalisation est la réduction des nuisances sonores lors de la pratique du wake-board (cf. figure 5). Le treuil permet l'enroulage d'une centaine de mètre de corde et permet la pratique d'un sport de glisse sur les étangs ou les lacs. Un pack de batterie de 48 V 48 Ah permet de s'affranchir de l'alimentation électrique via le réseau.



Fig. 5. Le treuil électrique pour la pratique du wake-board sur lac (le pack batterie n'est pas sur la photo). Réalisation Benjamin ROBIN [14].

2.2. Véhicule à 2 roues

On ne parlera pas des gyropodes à une roue qui ajoute un pilotage complexe du véhicule à une réalisation technologique pointue. Avec 2 roues, le véhicule gagne en stabilité. Toutefois, le risque de chute du pilote est un point négatif de ce type de véhicule qui est à prendre en compte lors des essais.

2.2.1. Gyropode à 2 roues

En 2009, la revue d'électronique *Elektor* proposait un kit pour la réalisation d'un gyropode à 2 roues : l'*ElektorWheelie* (cf. figure 6)[15]. Ce projet permet la réalisation de l'ensemble des cartes électroniques : variateurs pour les moteurs, microcontrôleurs pour le pilotage, interfaces des différents capteurs. Les programmes sont également accessibles et fournissent une très bonne base de travail.



Fig. 6. Le kit *ElektorWheelie* pour la réalisation d'un gyropode électrique [15].

2.2.2. Vélo ou tricycle électrique

Le vélo a également bénéficié du développement des solutions de transport électrique [7]. Un grand nombre de composants sont disponibles sur le marché et permet « facilement » la réalisation d'un « 2 roues » électrique (cf. figure 7).



Fig. 7. Le vélo électrique de l'IUT de l'Aisne [16]

Les véhicules à 3 roues permettent une meilleure stabilité sur la route (cf. figure 8). La position couchée

et le carénage diminuent la consommation et augmentent l'autonomie de ce « vélomobile ».



Fig. 8. Les vélomobiles à 3 roues électriques et le kart électrique de l'IUT de l'Aisne [16].

2.2.3. Les véhicules du challenge EducEco

L'Association pour le Développement d'Épreuves Éducatives sur l'Éco-mobilité (AD3E) propose une compétition automobile fondée sur la moindre consommation d'énergie [17]. Deux types de véhicules peuvent être conçus dans le cadre d'un règlement unique. Les véhicules *PROTOTYPE*, à 3 roues (cf. figure 9), sont destinés à établir la plus haute performance énergétique possible et les véhicules *ÉCO-CITADIN* à 4 roues (cf. figure 10) doivent, outre de réelles performances énergétiques, développer la notion d'utilisation avec les directives qui s'attachent aux notions de cycle de vie du produit et au développement durable.



Fig. 9. Prototype 3 roues pour EducEco [17].



Fig. 10. Véhicule 4 roues éco-citadin présent au challenge EducEco [17].

2.2.4. Moto électrique

Au-delà de 4-5 kW de motorisation, le « 2 roues » électrique (e.g. scooter ou moto) est classé dans la catégorie des cyclomoteurs. L'intégration mécanique du moteur et de la batterie constitue le point important de cette réalisation. Une batterie Lithium permettra de réduire la masse et le volume, tout en assurant une autonomie « correcte » d'une centaine de kilomètres (cf. figure 11).



Fig. 11. La moto électrique de Sébastien MAHUT, étudiant à l'IUT de l'Aisne [18]

2.3. Le kart électrique

De par sa conception simple et un assemblage démontable d'un grand nombre de pièces, le kart est un support mécanique qui se prête bien au travail avec des étudiants et à l'adaptation à la motorisation électrique (cf. figure 12). Disposant de 4 roues et d'un centre de gravité très bas, c'est un véhicule très stable. De plus, les étudiants sont habitués à faire du karting sur une piste sécurisée (et pas sur la route) ce qui simplifie grandement l'homologation et l'assurance du véhicule.



Fig. 12. Le kart électrique comme support pédagogique [19].

3. Les principaux composants du kart électrique

Cette section propose de passer en revue les composants nécessaires à l'électrification d'un châssis de kart et indique la répartition budgétaire du projet.

3.1. Châssis

Le châssis est bien souvent le premier investissement qui déclenche le projet. Un châssis d'occasion de kart de location sans moteur thermique se négocie entre 0 € et quelques centaines d'euros. En revanche, un châssis de kart de compétition sans moteur, avec des freins à disques à l'avant et à l'arrière, peut être négocié entre 400 €–500 € pour un modèle d'occasion et 2000 €–3000 € pour un modèle neuf.

3.2. Planning et premiers calculs

Le projet démarre en juin (en amont de l'année scolaire) par la négociation d'un budget pour l'achat des composants du kart électrique i.e. entre 2000 € et 5000 €.

Les étudiants peuvent démarrer dès la rentrée de septembre par l'étude mécanique du mouvement du kart afin de déterminer la puissance du moteur électrique. La découverte du projet, des composants et les premiers calculs peuvent leur prendre quelques mois [7].

La fixation mécanique du moteur, de son variateur et des batteries constituent les principaux points critiques du projet. Une modélisation mécanique du châssis de kart peut être faite afin d'étudier différentes solutions.

La société Kart Masters propose un kit de fixation du moteur qui s'adapte sur la majorité des châssis de kart.

Il n'existe pas de solution « simple » pour la fixation des batteries. En fonction du châssis utilisé, il faudra ajouter des renforts pour maintenir et fixer correctement les batteries.

La figure 13 montre qu'entre 40 et 60 km/h de vitesse de pointe, sur une piste plane (pente de 0%), il faut entre 2500 W et 4500 W pour vaincre les frottements de roulement et aérodynamique [7].

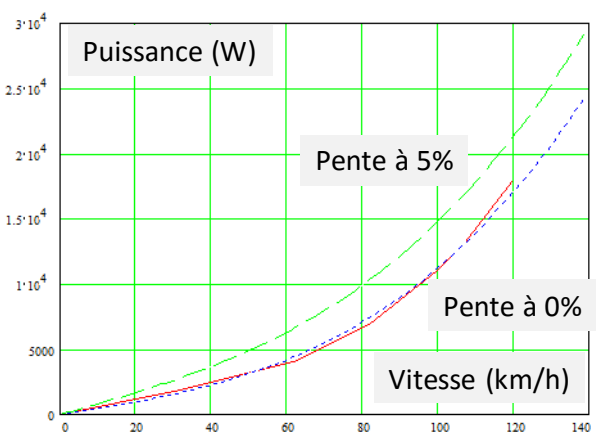


Fig. 13. Evolution de la puissance du moteur en fonction de la vitesse du kart, pour une pente de 0% et 5% [7].

Au-delà de cette valeur, la puissance (et donc le couple) supplémentaire servira pour l'accélération et la reprise du kart en sortie de virage.

Pour un fonctionnement à 5kW, sous 48 V, pendant 10 min, il faudra disposer d'une énergie de 833 Wh et donc d'une capacité de batterie théorique de 17,4 Ah

[7]. En considérant que cette énergie correspond à une décharge à 50% d'une batterie au plomb, un accumulateur d'une capacité supérieure à 34,7 Ah conviendra.

Cette puissance de 5 kW correspond à des courants de 100 A sous 48 V et 200 A sous 24 V. Avec une densité de courant maximale de 10 A/mm², la section des câbles d'alimentation sera de 16 mm² en 48 V et de 25 mm² en 24 V. De nombreux exemples de schéma de câblage sont disponibles sur le site de l'association e-Kart [20].

En novembre, la liste du matériel peut être constituée afin de pouvoir en disposer dès la rentrée de janvier.

L'assemblage peut alors commencer et peut, par exemple, être rapidement avancé en vue d'actions de promotion de l'établissement (e.g. Journées Portes Ouvertes de février-mars).

Il est préférable que le kart soit terminé avant le départ en stage des étudiants courant avril, et qu'il ne reste que les essais et les derniers réglages avant le challenge e-Kart de Limoges qui se déroule fin mai-début juin [21].

3.3. Moteur et variateur

Une large variété d'ensemble moteur/variateur est disponible :

- des moteurs à courant continu de 5 kW à 30 kW, avec des variateurs 1 ou 4 quadrants ;
- des moteurs asynchrones triphasés basse tension de 1,1 kW à 28 kW associés à des variateurs triphasés de 275 A à 650 A par phase ;
- des moteurs synchrones triphasés basse tension de 5 kW à 56 kW associés à des variateurs triphasés de 275 A à 650 A par phase.

Le moteur et le variateur représentent à part égal environ les 2/3 du budget.

3.4. Batterie et chargeur

Le dernier tiers du budget pourra être consacré à l'achat des batteries de stockage de l'énergie et de leur chargeur associé.

3.4.1. Batterie plomb ou cellules Lithium ?

Un petit budget (en dessous de 4500 €) impliquera l'utilisation de batteries au plomb de 12 V de technologie spiralee OPTIMA (ou EXIDE). L'enroulement des plaques de plomb permet de réduire la résistance interne de la batterie (3,2 mΩ pour une batterie « classique »), ce qui la rend résistante au décharge importante (jusqu'à 600 A voire 900 A) et capable de supporter des courants de charge importants de 50 A à 100 A. Des modèles disposant de capacités de 38 Ah et 48 Ah sont disponibles (cf. figure 14). La batterie de 55 Ah est plus lourde et plus chère, pour un gain en autonomie assez faible [11].

Les cellules au Lithium de « faible densité » permettent de diviser par 2 la masse de la batterie et de multiplier par 2 ou 4 l'autonomie du kart. Ce type de technologie supporte des taux de décharge de 80% à

100%. Elles sont simples à mettre en série (cavalier en cuivre et vis M6 ou M8), mais nécessite une surveillance de chaque élément via un BMS (Battery Management System) qui augmente encore le coût de la batterie (environ 1000 € pour le BMS).

Les cellules au Lithium de « forte densité » de type poche sont réservées au gros budget (environ 12 000 euros pour une batterie Lithium 72 V 86 Ah avec BMS), mais permettent de diviser par 4 la masse de la batterie par rapport à une batterie plomb, mais pour un coût hors BMS également multiplié par 4 !

3.4.2. Chargeur d'entretien ou chargeur rapide ?

Le cahier des charges des batteries utilisées dans ce type de projet pédagogique est typique. En particulier, le projet est en « sommeil » pendant presque une année et le véhicule n'est utilisé que quelques jours par an. Les batteries sont donc très souvent en mode « supervision ».

Pour les batteries au plomb de la marque OPTIMA qui ont un niveau d'autodécharge important (plus de 50% de pertes en 1 ou 2 mois), les chargeurs CTEK 12 V 7 A sont tout à fait adaptés. Ils sont capables d'assurer une charge des batteries en quelques heures tout en garantissant la fonction de « charge d'entretien » ou « Floating » (cf. figure 14). De plus, ils redémarrent automatiquement en cas de coupure de l'alimentation électrique. Un chargeur individuel (un par batterie) est systématiquement conseillé à cause des déséquilibres de charge entre les batteries.

Pour les cellules au Lithium, le problème est multiplié par le nombre de cellules. Il faut assurer l'équilibrage de la charge de chaque cellule. En effet, la charge de puissance est interrompue par le BMS qui détecte la cellule la plus chargée. Lorsque toutes les cellules sont équilibrées, avec des cellules de fortes capacités (supérieure à 40 Ah), il est préférable de déconnecter le circuit de surveillance qui tend à décharger la cellule. Lorsque la cellule n'est pas connectée, elle perd entre 5% et 10% de sa charge par an quand elle est neuve.

Le chargeur de puissance représente un investissement conséquent. Par exemple, 4 chargeurs KINGPAN 12 V 80 A ou un chargeur 48 V 50 A coûtent 2500 euros. L'association e-Kart prête des chargeurs de puissance et lors du challenge, il est possible d'utiliser le chargeur de puissance des équipes présentes.



Fig. 14. Exemple de la batterie au plomb OPTIMA JAUNE 12V 48Ah et du chargeur CTEK MXS 7.0 12V 7A [11].

4. Progression du projet d'électrification d'un kart

La progression présentée dans cette section s'appuie sur un exemple type. Les étapes peuvent être modifiées à souhait et de multiples possibilités s'offrent à chacun pour adapter le projet à son budget.

L'accord négocié avec la société Kart Masters pour l'année 2017 prévoit la reprise du matériel avec une décote entre 30% et 40%, en fonction du matériel et de son état lors du retour. Une décote de reprise de 40% est appliquée ici dans les exemples chiffrés.

4.1. Année 1 : l'investissement minimal

Les objectifs de cette première année sont :

- (1) Réaliser un kart électrique fonctionnel avant la fin de l'année scolaire.
- (2) Découvrir le domaine du kart électrique et acquérir les compétences spécifiques liées à ce projet (quelles soient techniques, économiques ou environnementales).
- (3) Impliquer au maximum les étudiants dans une démarche pédagogique motivante.
- (4) Respecter le budget initial.

Le tableau 1 détaille le prix des principaux composants du projet avec une option visant à minimiser le coût et une solution offrant plus de performance.

Il faut acquérir un châssis de kart sans moteur thermique, de préférence un kart de location qui sera plus robuste et qui possède généralement des bandes de protection périphérique.

Pour le moteur, la solution la plus simple à mettre en œuvre est un moteur à courant continu qui pourra être alimenté de 0 V à 48 V. Le moteur de type ME0909 est le plus économique et généralement disponible sous quelques jours. Le modèle ME1004 est deux fois plus puissant et a la particularité de pouvoir être alimenté en direct sur les batteries pour des applications de type tondeuse car le couple de démarrage disparaît rapidement au bout de quelques secondes.

Le variateur ALLTRAX 4844 un quadrant est aussi très simple à mettre en œuvre. La plage de la tension d'alimentation s'étend de 24 V à 48 V. Le courant maximal dans le moteur est programmable de 0 A à 450 A.

Afin de minimiser les coûts, la solution en 24 V avec 2 batteries de marque OPTIMA JAUNE 48Ah est retenue, avec 2 chargeurs CTEK 12 V 7 A. À ce stade de l'étude, il peut être judicieux de prévoir la fixation de 4 batteries pour le futur.

Les chargeurs étant fournis avec des pinces de charge, il est possible de les raccorder directement aux batteries, même si elles sont installées sur le kart et reliées au variateur. L'option d'installer la prise de charge unitaire PK 63A 7 broches, avec les câbles de liaisons de 16 mm² pour le socle, représente un surcoût de 261 € (cf. figure 15).



Fig. 15. Socle et prise PK 63A 7 broches pour la charge unitaire de 1 à 4 batteries 12V [11].

Le kit de câblage comprend entre autre le capteur PB6 pour l'accélérateur, les câbles de puissances, les cosses de puissance à sertir, le fusible et l'arrêt d'urgence.

L'interrupteur « Marche/arrêt » à clef 455, le coupe-circuit à fourchette et l'arrêt d'urgence forment la chaîne de sécurité pour la mise en marche du kart.

Le kit de transmission mécanique comprend un support qui permet de fixer aisément les moteurs du constructeur « Motenergy » sur un châssis de kart par pincement des tubes. Un rapport de transmission typique est proposé : poulie de 22 dents du côté du moteur et une couronne de 75 dents du côté de l'arbre de roue. La longueur de la courroie de largeur 30mm devra elle aussi être adaptée à la configuration du châssis. La version minimale ne comporte que la poulie 22 dents et son « Taper Lock » en diamètre 7/8 pouces.

Tab. 1. Fourchette de prix pour l'investissement initial en 24 V.

Matériel	Coût mini	Coût maxi
Châssis de kart	100 €	800 €
Moteur CC ME0909 / ME1004	633 €	762 €
Variateur ALLTRAX 4844	717 €	717 €
2 batteries OPTIMA 48Ah	547 €	547 €
2 chargeurs CTEK MXS 7.0	406 €	406 €
Kit de câblage	542 €	542 €
Prises PK63A + câbles 16mm ²	0 €	261 €
Kit transmission mécanique	66 €	410 €
TOTAL TTC	3 021 €	4 455 €

Le réglage du variateur se fait via une interface USB-RS232 et un logiciel gratuit disponible sur le site web de la société « Alltrac Inc. ». Après avoir adaptée la plage de tension de la batterie dans le variateur, il faut ajuster le courant dans le moteur à des valeurs raisonnables : le moteur ME0909 ne supporte 450 A que pendant seulement 30 s !

Avec une tension de 24 V, la vitesse de rotation du moteur ME0909 est d'environ 2 000 tr/min. La transmission de 22/75 donnera une vitesse maximale du kart de 30 km/h.

4.2. Année 2 : passage en 48V

A ce stade du projet, le kart fonctionne et le premier objectif est atteint.

Différentes études peuvent maintenant être menées : l'efficacité du freinage, l'impact de la modification de la transmission, le bilan de puissance

de la chaîne d'énergie « batterie-variateur-moteur », l'évolution de la température du moteur, la décharge de la batterie, la détermination du centre de gravité, etc.

Les performances en termes d'accélération sont impressionnantes, mais la vitesse de pointe limite un peu le plaisir sur piste. Ceux qui ont opté pour un rapport de transmission de 32/65 pourront atteindre 50 km/h, mais l'accélération sera bien moindre (environ la moitié de ce que fournit la transmission avec un rapport de 22/75).

Afin de profiter pleinement du moteur électrique (en doublant sa vitesse), il faut une alimentation en 48 V. Le variateur étant compatible, il faudra juste adapter les réglages pour la nouvelle tension.

Le tableau 2 synthétise les coûts du matériel nécessaire au passage en 48 V. L'achat de chargeur rapide (colonne « Coût maxi ») implique un budget double par rapport à la solution économique (colonne « Coût mini »).

Dans la version minimale, les 2 nouvelles batteries sont associées à 2 autres chargeurs CTEK MXS 7.0, mais la prise standardisée PK 63A est installée sur le kart. Elle permettra l'utilisation des chargeurs présents au Challenge e-Kart de Limoges.

Il est possible également d'envisager une solution de charge plus rapide : 40 A ou 80 A en fonction du budget.

L'avantage de conserver 4 chargeurs (un par batterie) est que les batteries seront rééquilibrées à chaque charge rapide de puissance. Dans tous les cas, les chargeurs disposent du mode « Floating » pour la charge d'entretien.

Tab. 2. Fourchette de prix pour le passage en 48V.

Matériel	Coût mini	Coût maxi
2 batteries OPTIMA 48Ah	547 €	547 €
Cosses batteries	64 €	64 €
2 chargeurs CTEK MXS 7.0	406 €	0 €
Avoir pour 2 chargeurs CTEK		-244 €
4 chargeurs Kingpan 12V 40A		1 543 €
(4 chargeurs Kingpan 12V 80A)		(2 422 €)
Prises PK63A + câbles 16mm ²	261 €	261 €
TOTAL TTC	1 278 €	2 577 €
(avec l'option 80A)		(3 456 €)

Comme il est très facile de passer largement au-delà des réglages nominaux du moteur, il faudra impérativement surveiller l'élévation de la température du moteur. Avec un réglage à 48 V et 150 A, le kart dispose d'un couple à la roue de 50 Nm et une vitesse de pointe de 56 km/h.

Le temps de recharge est de 15 min à 20 min pour 8 min-10 min de roulage (chargeur 40 A). Avec les chargeurs 80 A, le temps de charge est environ égal au temps de roulage.

4.3. Année 3 : la marche arrière

Le variateur ALLTRAX ne permet pas la récupération d'énergie au freinage. En effet, c'est un hacheur série composé d'un transistor relié à la masse

et une diode de roue libre reliée au « + » de la batterie (convertisseur 1 quadrant). Il n'existe pas sur le marché de variateur industriel 2 quadrants. Pour bénéficier du freinage, il faut utiliser le variateur « SEVCON Millipak » 4 quadrants. Le kart disposera alors de la marche arrière, ce qui est pratique pour les manœuvres et le stationnement dans les stands.

L'inconvénient de ce variateur est qu'il nécessite une interface de programmation (« dongle ») aussi onéreuse que le variateur (cf. tableau 3). En accord avec la société SEVCON, le logiciel de paramétrage est gratuit pour les écoles membres de l'Association e-Kart.

Le dongle de programmation est empruntable pour une courte durée auprès de l'Association e-Kart.

L'échange du variateur 1Q ALLTRAX contre le variateur 4Q SEVCON n'est pas très onéreux (cf. tableau 3).

Le kit de câblage supplémentaire indiqué dans le tableau 3 est composé d'un faisceau de câbles de commande avec une prise pour le branchement sur le variateur « SEVCON Millipak », d'un interrupteur « Avant / Neutre / Arrière » et d'un voyant de signalisation de l'état du variateur.

Tab. 3. Fourchette de prix pour le passage en 4 quadrants.

Matériel	Coût mini	Coût maxi
Avoir du variateur AXE 4844	-430 €	-430 €
Variateur SEVCON Millipak 4Q	639 €	639 €
Dongle d'interface Millipak	(en prêt)	645 €
Kit câblage Millipak 4Q	95 €	95 €
TOTAL TTC	304 €	949 €

Le variateur « SEVCON Millipak 4Q » peut très bien fonctionner sous 24 V, 36 V ou 48 V. Il permet de limiter le courant du moteur jusqu'à 300 A. Il est entièrement paramétrable et dispose de sécurités logicielles de fonctionnement, comme le blocage du démarrage si l'accélérateur est actionné à la mise sous tension.

La régénération de l'énergie est programmable et entrainera des questions sur la transmission mécanique. En effet, trop de freinage ajoute des contraintes supplémentaires sur la courroie.

Le freinage électrique permet de diminuer la consommation lors du roulage et donc de diminuer le temps de recharge, mais provoque un échauffement supplémentaire du moteur.

4.4. Année 4 : passage en moteur synchrone

La société « Motenergy » fabrique des moteurs synchrones basse tension « économique ». Ces moteurs sont tout à fait préconisés pour les véhicules électriques fonctionnant en basse tension.

Afin d'obtenir suffisamment de puissance pour le kart, il est conseillé de les alimenter à partir de 36 V. Les 3 produits « phares » de la Boutique Kart Masters Shop sont :

- (1) Le moteur « ME0907 », 5 kW sous 48 V, 2 500 tr/min, à 689 €.

- (2) Le moteur « ME0913 », 12 kW sous 48 V, 3 600 tr/min, à 833 €.
- (3) Le moteur étanche « ME1304 », 20 kW sous 48 V, 4 000 tr/min, à 967 €.

Ces moteurs nécessitent l'utilisation de variateurs triphasés basse tension fort courant. La société Kart Masters propose la gamme « GNE4 » du constructeur SEVCON en 24 V, 36 V, 48 V et 72 V pour des courants efficaces dans le moteur de 275 A, 350 A, 450 A, 550 A et 650 A, en fonction de la taille du variateur. La figure 16 présente les dimensions des 3 formats de variateurs de la gamme GEN4 utilisés pour les karts électriques.

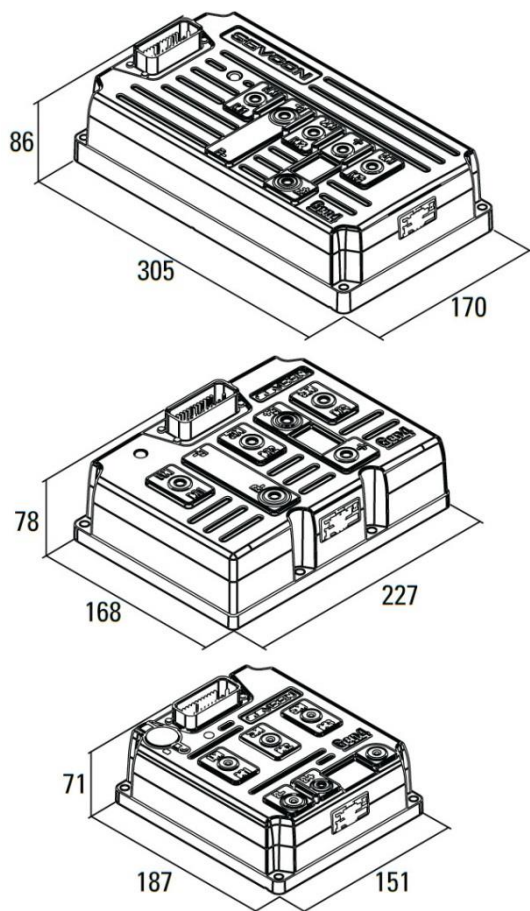


Fig. 16. Dimensions des variateurs SEVCON de la gamme GEN4 size 2 (en bas), size 4 (au milieu) et size 6 (en haut) [11].

Comme précédemment, le résumé du passage de la solution d'un moteur à courant continu vers un moteur synchrone est présenté dans le tableau 4. La version avec un moteur de 5 kW permet de minimiser le coût.

Pour le moteur « ME0907 » de 5 kW, un variateur « size 2 » 48 V 275 A est suffisant, mais ce variateur est légèrement plus cher (874 € contre 810 €) que le modèle « size 4 » 48 V 450 A (car plus vendu) : c'est la solution proposée pour minimiser le coût.

Les moteurs « ME0913 » et « ME1304 » s'accommoderont parfaitement d'un variateur « size 4 » 48 V 450 A, mais pour profiter de toute la

puissance des moteurs, le modèle en « size 6 » 48 V 650 A pourra être utilisé.

Les variateurs « SEVCON GEN4 » sont paramétrables via un bus CAN : il faut une interface spécifique « USB-to-CAN » et un nouveau logiciel (gratuit pour les écoles membres de l'Association e-Kart).

Dans le kit de câblage pour variateur « GEN4 » est fourni le faisceau de câble de commande avec une prise 35 broches, du câble en 50 mm² pour les liaisons moteur/variateur et un forfait de paramétrage et de test du variateur en usine.

Tab. 4. Fourchette de prix pour le passage en moteur synchrone.

Matériel	Coût mini	Coût maxi
Avoir mot. ME0909 / ME1004	-380 €	-457 €
Avoir du variateur Millipak 4Q	-383 €	-383 €
Avoir dongle Millipak 4Q	-0 €	-387 €
Moteur ME0907 / ME1304	689 €	967 €
Variateur GEN4 4845 / 4865	837 €	1 197 €
Interface « USB-to-CAN »	(en prêt)	530 €
Kit câblage GEN4	360 €	360 €
TOTAL TTC	1 123 €	1 826 €

Le variateur GEN4 est un peu plus difficile à mettre en œuvre : la problématique est transférée sur les aspects informatiques. Il faut pouvoir disposer d'un ordinateur (pas trop vieux), avec une liaison internet (assez rapide), installer le logiciel SEVCON DVT (et obtenir la licence) et installer le logiciel « Team Viewer » pour la prise en main à distance de l'ordinateur par le Service-Après-Vente afin de dépanner les problèmes.

Par contre, les multiples possibilités de réglage et de configuration en font un vrai centre d'intérêts pour des exploitations pédagogiques.

Comme le kart gagne en performance, une piste à explorer est la réduction de masse (du châssis et/ou des composants). Le passage en batterie au plomb d'une capacité de 38 Ah permettra de réduire la masse du kart (11,6 kg pour la batterie de 38 Ah contre 16,6 kg pour le modèle 48 Ah). L'accélération sera plus importante et la consommation électrique moindre [7].

4.5. Année 5 : passage en 72 V

L'action combinée du passage en batterie 38 Ah et de l'ajout de 2 batteries supplémentaires n'impacte la masse de batteries que de 3,2 kg (69,6 kg pour 6 x 38 Ah contre 66,4 kg pour 4 x 48Ah).

L'augmentation de la tension d'alimentation permet aux moteurs électriques de développer plus de puissance grâce à une vitesse de rotation plus importante. Ceci permet également de réduire le courant dans la batterie pour une puissance donnée.

Les moteurs « ME0913 » et « ME1304 » seront associés à un variateur « size 4 » (72 V 350 A 2,7 kg), ou le modèle en « size 6 » (72 V 550 A 4,6 kg). Le tableau 5 reprend des différentes modifications du projet précédent.

Le câblage reste identique à la version 48 V. Il faut juste ajouter une prise de charge unitaire pour les 2 batteries supplémentaires (et leurs cosses) et 2 chargeurs de puissance (cf tableau 5).

Tab. 5. Fourchette de prix pour le passage en 72 V.

Matériel	Coût mini	Coût maxi
Avoir des 4 batteries 48Ah	-656 €	-656 €
6 batteries OPTIMA 38Ah	1 290 €	1 290 €
2 chargeurs 12V 40A / 80A	772 €	1 211 €
Avoir var. GEN4 4845 / 4865	-502 €	-718 €
Variateur GEN4 8035 / 8055	837 €	1 197 €
Kit câblage 72V	295 €	295 €
TOTAL TTC	2 035 €	2 619 €

Avec 20 kW (27 ch) ou 30 kW (40 ch) de puissance électrique, le niveau de performance atteint ici par un kart électrique est comparable à celui d'un kart thermique de compétition (125 cm³ sans boîte de vitesses d'une puissance de 15 ch à 35 ch) [23].

4.6. Année 6 : les batteries Lithium

Un avantage de la montée de la tension continue est la limitation du courant de la batterie à des valeurs de l'ordre de 200 A à 400 A. Cela convient bien aux batteries au Lithium : les pertes par effet Joule dans les câbles et dans la batterie en seront réduites de façon importante (car proportionnelles au carré du courant).

Les cellules au Lithium permettront de réduire encore la masse de la batterie et d'augmenter l'autonomie du kart. Deux technologies sont disponibles sur la Boutique Kart Masters Shop :

- (1) Les cellules au Lithium « CALB CA » LiFePO4 « Low Density » (faible densité) 94 Wh/kg, prismatique.
- (2) Les cellules au Lithium polymère « LCO EPS » 156 Wh/kg, en poche.

Afin d'avoir une masse de cellule Lithium inférieure à la masse des 6 batteries « OPTIMA » 38 Ah (qui est de 69,6 kg), 2 approches sont présentées dans le tableau 6 :

- (1) Le passage en 48 V avec 16 cellules « CALB » 100 Ah, pour une masse totale de 54,4 kg (5 956 €).
- (2) En 72V, avec 48 cellules « EPS » 43 Ah, 2 en série et 24 en parallèle (« 2P24S »), pour une masse de 49 kg et une capacité équivalente de 86 Ah.

Le kit de cellules au Lithium comprend les éléments nécessaires à la mise en série (et en parallèle), un BMS et une télécommande pour superviser l'état de la batterie.

L'offre de reprise en 48 V se base sur 4 batteries au plomb 12 V 48 Ah et 4 chargeurs 12 V 40 A. En 72 V, le calcul est effectué pour 6 batteries au plomb 12 V 38 Ah et 6 chargeurs 12 V 80 A.

Tab. 6. Fourchette de prix pour le passage en Lithium.

Matériel	Coût en 48V LD	Coût en 72V HD
Avoir des 4 / 6 batteries 48Ah	-656 €	-774 €
Batterie CALB 100Ah 48V LD	5 956 €	
Batterie EPS 86Ah 72V HD		11 922 €
Avoir des 4 / 6 chargeurs 12V	-926 €	-2180 €
Chargeur ZIVAN 48V 50A	1 361 €	
Chargeur ZIVAN 72V 85A		2 957 €
TOTAL TTC	5 735 €	11 925 €

Le passage en batterie au Lithium double le budget initial du kart électrique, mais permet d'optimiser la masse du véhicule et de passer de 200 kg-250 kg pour un kart au plomb à 110 kg-150 kg pour un kart au Lithium. De plus, l'autonomie est multipliée par 4 par rapport à la technologie plomb, pour atteindre environ 1 heure de roulage. Avec de telles performances, il faudra impérativement avoir un bon châssis de kart de compétition, avec de préférence des freins hydrauliques à l'avant (et à l'arrière).

5. Conclusion

Dans la réalisation d'un projet d'électrification d'un véhicule, il est important que dès la première année le projet puisse aboutir, même avec des performances modestes. Le budget initial d'investissement étant relativement important, la hiérarchie qui finance sera sensible à cet argument et le véhicule pourra servir rapidement de support de communication lors des journées portes ouvertes et des différents salons pédagogiques de promotion de l'établissement.

Avec le concours de l'Association e-Kart et à la société Kart Masters, il est possible de faire évoluer ce projet d'électrification sur plusieurs années, par l'échange et l'ajout de matériel plus performant (cf tableau 7).

Le passage avec des batteries Lithium est possible mais double le budget du véhicule !

Autour de la réalisation du véhicule électrique, il est possible de proposer aux étudiants une multitude de projets, dans des domaines très variés [24][7].

Tab. 7. Bilan de l'évolution financière du kart électrique.

Année	Version mini	Version haute
1) Investissement en DC 24 V	3 021 €	4 455 €
2) Passage en 48 V (1 quadrant)	1 278 €	3 396 €
3) Variateur 4 quadrants	304 €	949 €
4) Moteur synchrone en 48V	1 123 €	1 826 €
5) Moteur synchrone en 72V	2 035 €	2 619 €
TOTAL TTC sur 5 années	7 761 €	13 305 €
6) Passage en batterie Lithium	+5 735 €	+11 925 €

6. Bibliographie

- [1] D. EYMARD, *Le kart électrique : une application pédagogique*, Revue Technologie, N° 120, mai-juin 2002, pp. 74-76.
- [2] P. LEBRUN, *Conception et réalisation d'un véhicule électrique*, Revue Technologie, N° 125, avril 2003, pp. 56-58.
- [3] P. LEBRUN, *Conception et réalisation d'un véhicule électrique*, Revue 3EI, N° 34, septembre 2003, pp. 16-20.
- [4] M. CHAVES, L. PERRO, A. ROQUE, D. PRATA, J. MAIA, P. VERDELHO, J. ESTEVES, *Control of an Electrical Kart With Two Independent Motors*, EPE Proceedings, Septembre 1999.
- [5] J. Van MIERLO, J.-M. TIMMERMANS, P. LATAIRE, P. Van Den BOSSCHE, *Project oriented education: Build your own electric go-kart*, European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2005, 9 pages.
- [6] T. LEQUEU, B. BIDOGLIA, A. SCHELLMANN, Y. DERRIEN, N. GODEFROY, *Exemples d'applications pédagogiques autour du kart électrique e-kart*, CETSIS 2007, Bordeaux, 29-31 octobre 2007, 6 pages.
- [7] A. SIVERT, T. LEQUEU, *Je construis mon véhicule électrique - Vélo, Kart, Moto*, collection ETSF, Dunod, juillet 2013, 144 pages.
- [8] A. SIVERT, F. BETIN, T. LEQUEU, *Réalisation d'un kart électrique performant : gestion de l'énergie embarquée et choix technologiques*, CETSIS 2014, Besançon, 27-29 octobre 2014.
- [9] Le site web de l'Association e-Kart <http://www.e-kart.fr/>, consulté le 8 août 2016.
- [10] Le site web de la société Kart Masters <http://www.kartmasters.fr/>, consulté le 8 août 2016.
- [11] Le site web de la Boutique Kart Masters Shop <http://www.kartmasters.fr/shop/>, consulté le 8 août 2016.
- [12] J. MERDY, B. SOHIER, T. JORON, le site web AILEC (Aéro Innovation Loisir ÉleCtrique), <http://www.ailec.fr/>, consulté le 8 août 2016.
- [13] S. LELONG, le site web des pilotes d'ULM de type PULMA, <http://appulma.org/>, consulté le 8 août 2016.
- [14] B. ROBIN, *Ride'n Touraine - Réalisation d'un treuil électrique pour la pratique du wakeboard*, projet personnel, juillet 2013.
- [15] ElektorWheelie sur le site web de la revue Elektor, <https://www.elektormagazine.fr/magazine/elektor-200909/11389>, consulté le 8 août 2016.
- [16] Le site web des engins électriques à l'IUT GEII de Cuffies-Soissons, <http://aisne02geii.e-kart.fr/>, consulté le 9 août 2016.
- [17] Le site web du challenge EducEco, <http://www.educeco.net/>, consulté le 9 août 2016.
- [18] Le site web de la moto électrique de Sébastien MAHUT, <http://seb-moto.e-kart.fr/>, consulté le 9 août 2016.
- [19] Le site web de l'association Kartelec, <http://www.kartelec.com/>, consulté le 9 août 2016.
- [20] T. LEQUEU, Exemple de câblage du circuit électrique d'un kart, <https://e-kart.fr/documentation/trucs-astuces/279-exemple-de-cablage-du-circuit-electrique-d-un-kart.html>, consulté le 11 août 2016.
- [21] Site web <http://www.e-kart.fr/2017/>, consulté le 10 août 2016.
- [22] Site web <http://www.thierry-lequeu.fr/>, consulté le 8 août 2016.
- [23] A. SIVERT, F. BETIN, J.-P. BECAR, T. LEQUEU, *Do Electric Go-Karts Are Getting Better than Gas-Powered Ones?*, EVER Monaco, 2012, 6 pages.
- [24] T. LEQUEU, *Un support pédagogique pluritechnologique : le kart électrique*, <http://www.iutenligne.net>, mise à jour du 21 janvier 2005.

Batteries de smartphone (applications, diagnostique)

A.SIVERT¹, B.VACOSSIN¹, F.BETIN¹, N.DAMAY²

(1) Laboratoire des Technologies Innovantes (L.T.I), équipe Énergie Électrique et Systèmes Associés (EESA)

U.P.J.V Université de Picardie Jules Verne, Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII, 02880 SOISSONS.

(2) Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire d'Electromécanique, 60203 Compiègne

Résumé : pour faire comprendre aux étudiants le fonctionnement, le vocabulaire et la problématique des batteries et des chargeurs, leur smartphone constitue un excellent support pédagogique. Et les questions s'y rapportant sont nombreuses : quels sont les outils qui peuvent être utilisés pour faire l'étude et le diagnostic de la batterie ? Comment la capacité énergétique est-elle mesurée et donnée en pourcentage ? Comment peut-être estimée l'autonomie ? Quelles sont les applications les plus énergivores ? Combien de temps faut-il pour recharger le smartphone, à partir d'un port USB ou à partir de son chargeur via le secteur ? Est-ce que tous les chargeurs se valent ? Peut-on maximiser la durée de vie de la batterie ? Peut-on connaître le travail effectué par la batterie depuis le début de son utilisation ? Est-ce que les caractéristiques des batteries extérieures sont correctes ? Cet article va tenter de répondre à toutes ces questions en présentant les méthodes utilisées.

Tant que l'autonomie est satisfaisante pour les usages quotidiens qu'il en a, l'utilisateur se soucie peu de sa batterie. Mais lorsque l'autonomie chute alors il manque souvent de connaissances pour comprendre d'où vient le problème.

1. Introduction

Pour utiliser des appareils nomades, faut-il comprendre comment fonctionnent les batteries et quelles en sont les limites ? Evidemment que non, mais quelques connaissances permettent de mieux comprendre la gestion de l'autonomie des smartphones. A la lecture du sujet « consommation énergétique d'un smartphone » dans Wikipédia [1], ainsi qu'aux vues de nombreux articles scientifiques [2], la consommation des smartphones semble représenter un enjeu crucial et un argument de vente important [3]. Or, tous les smartphones mesurent la tension, le courant, la capacité énergétique de la batterie et la consommation de chaque application. Par conséquent, il est possible de les caractériser électriquement et de réaliser un diagnostic à l'aide de tests adaptés.

En effet, le nombre de cycles, la résistance interne et la capacité énergétique de la batterie peuvent varier du simple au double en fonction de la chimie et du constructeur pour un même packaging.

En 2016, la batterie est encore considérée comme un accessoire par tous les fabricants de smartphones et n'est garantie que 6 mois alors que le reste de l'appareil est garanti 2 ans.

L'autonomie d'un smartphone va dépendre de son utilisation mais aussi de l'état de santé de sa batterie qui se dégrade plus ou moins vite.

Mais comment tester et connaître l'état santé de la batterie ?

De nombreuses applications prétendent tester la batterie et re-calibrer la mesure de l'état de charge en pourcentage, mais elles ne dévoilent pas leur méthode.

Cet article présente une partie du travail demandé aux étudiants sous la forme de questions corrigées qui peuvent être téléchargés via un lien [4].

A quel niveau d'études correspondent ces questions et quels sont les prérequis attendus des étudiants ?

2. Prérequis et niveau d'études

L'étude présentée est proposée aux étudiants de deuxième année de DUT Génie Electrique et Informatique Industrielle (GEII), qui connaissent juste le modèle électrique d'une batterie (Thévenin) sans connaître le vocabulaire ni les problématiques qui y sont associés. L'objectif est de leur faire découvrir la problématique proposée avec leur propre *smartphone* ou avec une tablette sous *OS Android*. Chaque compte-rendu sera donc différent évitant ainsi la recopie de résultats.

Le retour d'expérience obtenu depuis 2 ans montre que les étudiants pensent faire l'étude en moins d'une heure mais, en réalité, qu'ils y passent environ cinq heures (bien que les réponses avec des exemples de copie d'écran du *smartphone* sont déjà données). On montre aussi que 80% d'étudiants découvrent les applications les plus énergivores de leur *smartphone* et que 75% d'entre eux comprennent pourquoi il y a des différences de temps de charge. Malgré ces résultats, les connaissances de beaucoup d'étudiants doivent être consolidés au cours d'une correction d'une heure effectuée pendant une séance de Travaux Dirigés d'un module traitant des énergies renouvelables. Dans tous les cas les batteries sont étudiées en tant que moyen de

stockage. Evidemment, en fonction du cursus, les questions doivent être remaniées. En revanche, les exercices restent suffisamment faciles pour des lycéens en STI2D ainsi que pour des collégiens de troisième qui font l'étude des batteries en physique [9]. D'ailleurs, une partie de cette étude est effectuée lors de La Fête de la Science pour ce niveau d'études, en 35 minutes, dans le cadre d'un atelier exploitant les applications qui vont être présentées dans cet article. Ces applications évoluant sous Android et gratuites sont « **Battery Monitor Widgets** », ainsi que « **Charge Cycle Battery Stats** ». Elles sont mises en œuvre avec des smartphones de type *Xperia Z3*.

3. Questions sur les batteries de type Li-ion

- 1) A partir de la figure (1) suivante, indiquer quelle est la technologie et la tension maximale de cette batterie ? Donner sa capacité énergétique en A.h et W.h ?



Figure 1 : caractéristiques d'une batterie Xperia Z3

Réponse : Li-Polymer, 4,35V, 3,1A.h, 11,8W.h

- 2) Pourquoi sur les informations de la batterie, le nombre de W.h ne correspond-il pas à la tension maximale multipliée par les A.h ? Quelle est alors la tension nominale de cette batterie ?

Réponse : $11,8W.h/3,8V=3,1A.h$ car la tension varie de 4,35V à 3,4V lors de la décharge donc 3,8V est une valeur moyenne, c'est la tension nominale.

- 3) Pourquoi ne faut-il pas décharger une batterie lithium entièrement (soit 100% de DOD - *Depth Of Discharge*) ? Que se passerait-il si cette limite était atteinte ?

Réponse : s'il y a une décharge très profonde la batterie se met en court-circuit (tension nulle). Donc, lors d'une décharge de 100%, le smartphone se met en veille automatiquement. En pratique, la batterie est utilisée jusqu'à 80% de ses possibilités.

- 4) Pourquoi la capacité énergétique indiquée par la batterie est-elle de 3,1 A.h alors que le smartphone indique 2,5A.h ?

Réponse : il y a une réserve d'énergie de 20% gérée par l'OS Android : le smartphone se met en veille et cela à partir de 0% affiché.

Maintenant, l'application de mesure de charge et de décharge va être étudiée.

4. Questions à partir des graphiques produits par l'application

L'application donne les courbes (figures 2 et 3) de la capacité énergétique restante, de la tension, du courant, de la puissance d'utilisation (milliwatts) et de la température de la batterie.

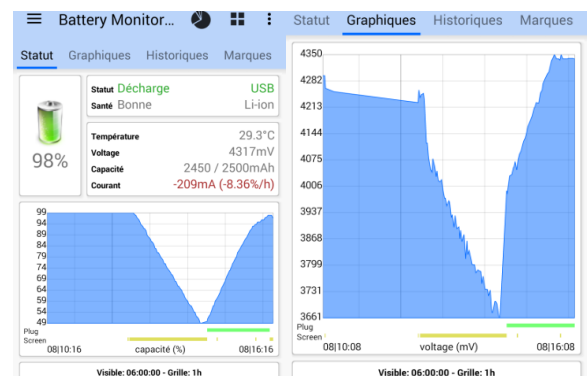


Figure 2 : état de la batterie (% et tension) en fonction du temps

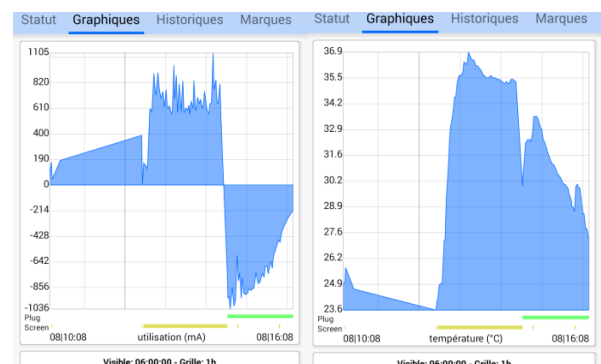


Figure 3 : évolution du courant et de la température de la batterie en fonction du temps avec une température ambiante de 23°C

- 5) A quoi correspond le courant négatif donné par l'application ? Pourquoi la température augmente-t-elle fortement lorsque le courant est important ?

Réponse : le courant négatif correspond à la charge (« plugged » = branché - en charge → ligne verte sur les graphiques). Etant donné que la batterie a une résistance interne, pour un courant relativement important le dégagement de chaleur (par effet joule) provoque une augmentation de la température. On peut aussi observer que la consommation est hachée relativement à l'utilisation des différentes applications.

- 6) Lorsque le courant est positif, la résistance interne de la batterie provoque une chute de tension importante. Cette résistance varie en fonction de la DOD et de la température. Mais entre 10°C et 35°C et pour une DOD comprise entre 90% et 20% de la capacité énergétique, on considérera cette résistance comme constante. Déterminer alors la résistance interne en décharge et en charge à partir de l'équation (2) suivante et de la figure suivante (?)
- $$\text{Résistance} = \Delta U(V) / \Delta I (A) \quad (2)$$

Réponse :

$$\text{Résistance}_{\text{charge}} = (4,167 - 4,027) / (0,57) = 0,24 \Omega$$

$$\text{Résistance}_{\text{décharge}} = (4,204 - 4,062) / (0,38) = 0,37 \Omega$$

Il y a une différence entre les résistances de charge et de décharge. D'où un incrément de température plus important en décharge pour la même valeur de courant. La tension à vide s'appelle OCV (Open-Circuit Voltage). Elle est difficilement mesurable sur un smartphone car il y a toujours un petit courant consommé.

5. Etude de la charge de la batterie

Pour connaître la capacité énergétique, on utilise généralement la méthode coulométrique. Celle-ci consiste à intégrer le courant en fonction du temps (numériquement) comme le décrit l'équation (3) :

$$\text{Capacité}_n = I_{\text{décharge}} \cdot (\Delta \text{Temps}) + \text{Capacité}_{n-1} \quad (3)$$

Cependant, il faut faire une remise à 0 lors de la charge complète pour ne pas avoir de décalages dus aux erreurs de mesure [7]. Il y a deux solutions pour réaliser cette fonction :

- l'application réalise l'intégration numérique à partir des données qu'elle enregistre ;
- un circuit intégré réalise cette fonction avec une fréquence d'échantillonnage assez élevée ce qui permet d'améliorer la précision, ainsi qu'à l'application d'être libérée du calcul précédent.

Avec l'OS Android, on peut observer que cette fonction est réalisée par un circuit intégré [5].

- 7) Pourquoi, lors de la charge, le courant diminue lorsque la tension atteint 4.35V comme on peut l'observer sur la figure 4 suivante ?

Réponse : lorsque la tension de l'élément atteint cette limite, alors la charge est dite à tension constante et le courant diminue jusqu'à être suffisamment proche de 0A. Avant, la charge est dite à courant constant, mais étant donnée l'utilisation possible du smartphone durant cette phase le courant fluctue légèrement.

On peut remarquer sur la figure 5 que lorsque la charge est à courant constant, elle est rapide pour une jauge énergétique inférieure à 80%. Puis, il faut presque encore 1 heure pour compléter la charge jusqu'à 100% car le courant diminue. Par conséquent, la charge à courant constant est dépendante de la résistance interne et du courant de charge.

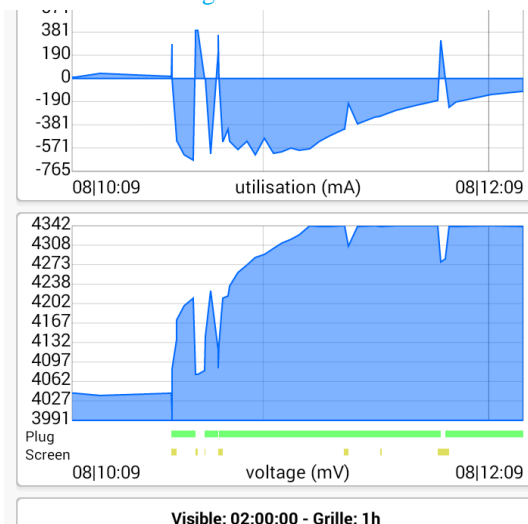


Figure 4 : évolution du courant et de la tension en fonction de la charge de la batterie

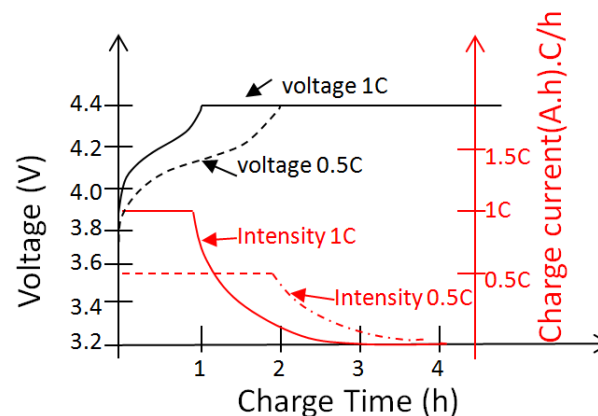


Figure 5 : évolution du courant et de la tension en fonction du temps pour une batterie (charge à courant constant, puis charge à tension constante) avec une charge à 1 C ou 0.5 C

Toutes les batteries lithium sont prévues normalement pour être rechargées avec un taux de charge de 1C (1 heure), mais l'énergie perdue dans la résistance interne de la batterie doit être facilement évacuée pour ne pas atteindre 50°C car cette température accélère le vieillissement.

Le courant de charge de la batterie va dépendre du courant que peut fournir le chargeur. En effet, le courant du chargeur est donné par l'équation (4) suivante :

$$I_{\text{chargeur}} = I_{\text{batterie}} + I_{\text{smartphone}} \quad (4)$$

- 8) Examiner votre chargeur traditionnel. Indiquer son courant de sortie nominal sous 5V et déduisez-en son taux de charge qui se calcule en « ampère /

unité de capacité de la batterie ». Puis pour une tension bien inférieure à 4,3V, relever les courants de charge avec l'écran allumé puis éteint ?

Réponse : le courant de charge est de 800 mA, donc le taux de charge est seulement de $0,25C=0,8A/3,1A.h$.

Lorsque l'écran du smartphone est allumé la charge est de 460 mA car l'écran nécessite 340mA. Mais si l'on éteint l'écran, la charge passe à 750mA (Cf. figure 3).

Remarque : si l'on utilise le *smartphone* et qu'on le charge en même temps, la batterie est moins sollicitée. Mais si un chargeur de 2A avait été utilisé, alors la charge aurait été de 800 mA, car c'est le smartphone qui limite le courant de charge de la batterie. Donc, il est possible de prendre n'importe quel chargeur qui fournit un courant supérieur à celui préconisé par le constructeur.

- 9) Avec le maximum d'applications fermées, relever la mesure de la puissance maximale fournie par l'alimentation 5V des ports USB 2 et USB 3 [6] ?

Réponse : le port USB 2 peut délivrer une puissance maximale de 2,5 Watt, donc un courant de 0,5A pour 5V.

L'USB 3 délivre une puissance de 4,5 Watt donc un courant de 0,9 A.

- 10) Expliquer pourquoi le temps de charge est plus long avec un port USB 2 de PC qu'avec un chargeur branché sur le secteur. Donner le courant de charge ?

Réponse : avec le port USB 2, le courant de charge du *smartphone* est seulement de 480mA (figure 7) sous 3.8V ce qui correspond à 1.8W alors qu'il aurait dû être de :

$$I_{\text{chargeUSB}} (A) = (P_{\text{USB}} / \text{tension}_{\text{batterie}}) * \text{rendement}_{\text{charge}} \quad (5)$$

$$I_{\text{chargeUSB}} (A) = (2.5W / 3.V8) * 0.9 = 600 \text{ mA}$$

Remarques : les *smartphones* définissent la charge en fonction du type de chargeur qu'ils ont identifié et non en fonction des performances du chargeur connecté. Ce choix est effectué en fonction de la résistance mesurée sur les deux fils de données (*data*) de la connexion USB. Certains *smartphones* utilisent la technologie de charge rapide de la société *Qualcomm* qui est capable de charger un téléphone mais en utilisant uniquement les lignes de données (D+/D-) de la connexion USB. Il est donc impossible de charger rapidement et de vouloir utiliser la communication en même temps. Une alternative consiste alors à utiliser le câble VOOC, équipé de 7 conducteurs contre 4 pour un câble USB standard. Il existe actuellement bien d'autres solutions de recharge rapide [11], en fonction des constructeurs, en attendant des normalisations.

Mais pourquoi faut-il recharger rapidement ? La consommation due à l'utilisation des applications serait-elle plus importante que la capacité énergétique de la batterie sur une journée ?

6. Etude de la consommation de la batterie

La consommation de la batterie va dépendre de l'horloge du processeur (*CPU*, *Central Processing Unit*) du *smartphone*. La consommation du *CPU* est proportionnelle à la fréquence de fonctionnement choisie. D'ailleurs, l'ajustement dynamique de la fréquence est fortement utilisé sur les *smartphones*. Nous n'allons pas étudier cette partie dans cet article mais juste donner un ordre de grandeur de la consommation des différents organes du *smartphone*.

- 11) Quel est le courant de décharge de l'écran avec le Wi-fi ?

Réponse : 340 mA sous 3,8V soit 1,29W.

- 12) Combien de temps la batterie pourra-t-elle tenir avec le courant précédent si la batterie est à 80% et que sa capacité utilisable est 2500 mA.h ?

Réponse : ?

- 13) Quel est le courant de décharge de la DEL *flash* de votre *smartphone* (le déduire de la valeur de celui lié à l'écran) ?

Réponse : $900 \text{ mA} - 340\text{mA} = 560 \text{ mA}$ sous 3,8 V.

- 14) Donner la valeur de l'incrément de température de la batterie pour un courant correspondant à l'alimentation de la DEL et de l'écran et ce, à partir d'une température ambiante et jusqu'à la stabilisation (régime permanent) ?

Réponse : $T=35^{\circ}\text{C}-23^{\circ}\text{C}=12^{\circ}\text{C}$ (figure 3).

Remarque : la DEL est assez éloignée de la batterie pour que son échauffement ne provoque pas une augmentation de celle de la batterie.

- 15) Quelle est la valeur du courant absorbé lors de l'utilisation du GPS du *smartphone* (la déduire de la valeur de celle liée à l'écran) ?

Réponse : $420 \text{ mA} - 340 \text{ mA} = 80 \text{ mA}$.

- 16) Est-ce que le courant de décharge est constant quelle que soit l'utilisation ?

Réponse : non, il est difficile d'estimer l'autonomie en fonction de l'utilisation et des applications qui tournent.

L'OS Android va donner un pourcentage du niveau d'utilisation de la batterie : « paramètres / gestion de l'alimentation / utilisation de la batterie » (icône « camembert » de l'application « battery monitor »).

- 17) Pour connaître l'état de santé (*SOH, State of Health*) de la batterie, décharger celle-ci jusqu'à 0%. Quelle est la tension minimale à partir de laquelle le smartphone s'est mis en veille (*cut-off voltage*) ?

Réponse : 3,4 V (avec la réserve supplémentaire de 20 %).

Il a fallu 3 heures pour recharger à 100% la batterie avec un courant de 0,78 A. Si l'on fait un calcul grossier de la capacité énergétique demandée à la question suivante, on retrouve la capacité énergétique utilisable de la batterie.

- 18) Quelle est la relation entre la capacité énergétique de la batterie en % et en A.h ? Pourrait-on connaître la capacité énergétique en mesurant la tension de la batterie (justifier) ?

Réponse : exemple à partir de la figure 2.

Donc, si la valeur de la capacité nominale de la batterie n'est pas correcte alors la capacité indiquée restante ne correspondra à rien.

On peut observer sur les figures 2 et 3 que la relation entre la tension et la capacité énergétique mesurée en A.h n'est pas linéaire. De plus, pour la tension maximale de 4,35 V cela ne correspond pas à 100% de la capacité énergétique.

7. Diagnostic de la batterie

- 19) Après l'avoir déchargée à 0 % et laissée refroidir (≈ 30 min), mettre le smartphone en charge. Est-ce que cette nouvelle capacité énergétique correspond à celle indiquée par le constructeur ?

Réponse : à partir de la réponse fournie à la question 17, on peut dire que la capacité énergétique de la batterie obtenue correspond approximativement à celle indiquée.

- 20) Quel est l'écart maximal entre la température de la batterie et la température ambiante lors de la charge avec écran éteint ?

Réponse : 5°C.

En déduire la résistance thermique de la batterie à partir de l'équation (8) suivante :

$$R_{TH}(\text{°C/W}) = (T_{\text{atteinte}} - T_{\text{ambiante}}) / (R_{\text{batt}} * I_{\text{charge}}^2)$$

Réponse :

$$R_{TH}(\text{°C/W}) = (T_{\text{atteinte}} - T_{\text{ambiante}}) / (R_{\text{batt}} * I_{\text{charge}}^2)$$

$$= (5\text{°C} / 0.25\Omega * 0.78\text{A}^2) = 5\text{°C} / 0.15\text{W} = 33\text{°C/W}$$

Combien de temps a-t-il fallu pour atteindre 63% de la température finale en régime établi lors de la charge ?

Réponse : ce temps correspond à la constante de temps thermique τ_{TH} de la batterie : 780 secondes mesurées.

En déduire la capacité thermique (9) :

Réponse :

$$C_{TH}(\text{J/°C}) = \tau_{TH}(s) / R_{TH} = 780 / 33 = 23.6 \text{ J/°C}$$

Remarque : en décharge avec la DEL flash allumée et l'écran allumé, l'incrément de température est de 12°C comme on peut l'observer sur la figure 3.

$$R_{TH} = (12\text{°C} / 0.35\Omega * 0.95\text{A}^2) = 12\text{°C} / 0.31\text{W} = 39\text{°C/W}$$

On retrouve approximativement la valeur de la résistance thermique lors de la charge.

- 21) Imaginons une charge avec un courant de 10 A. Quelle sera alors la température atteinte par la batterie si la température ambiante est de 25°C ?

La température de la batterie est un facteur limitant puisque celle-ci ne doit pas excéder 50°C. Comment réduire alors l'impact de cette limitation (sachant, de plus, que dans l'environnement réduit d'un smartphone, le CPU et le GSM transmettent aussi leurs déperditions thermiques à la batterie) ?

Réponse :

La température étant un facteur limitant, on comprend pourquoi il n'est pas possible de charger très rapidement une batterie. La résistance de la batterie va dépendre de ses dimensions mais il n'est pas possible d'agrandir la batterie... En revanche, il serait possible de la refroidir avec une ventilation forcée.

- 22) L'application indique l'état de santé de la batterie. Comment ce diagnostic est-il réalisé ?

Remarque : après un certain nombre de cycles la résistance interne de la batterie augmente et la capacité énergétique de la batterie diminue de 15% à 20% par rapport à la capacité d'origine.

Réponse : après un cycle de décharge à 100% et de recharge, la méthode coulométrique permettra de déterminer la capacité énergétique qui peut ainsi être mise à jour.

Pour une même consommation en courant, une augmentation de la résistance va provoquer une plus grande chute de tension. Ainsi, la limite basse en tension de la batterie sera atteinte plus rapidement ce qui diminue encore la capacité utilisable affichée. De plus, une résistance plus importante entraîne un échauffement supplémentaire qui peut également provoquer la mise en veille du smartphone.

23) Après plus de 10 heures d'utilisation classique de votre *smartphone*, se rendre dans le menu « marques » et effectuer une copie d'écran du résumé statistique de l'utilisation passée. Interpréter ce relevé (ex. : figure 6).

Réponse : l'application calcule la consommation moyenne en %/heure : sur 19 heures et 16 min d'utilisation, 1h et 31 min a été consacrée à la charge avec un taux de 22.5%/h et 16 min à la charge avec un taux de 7.5%/h (tension constante). La décharge a duré 17h avec l'écran éteint consommant -1.41%/h. Une décharge de 22 min à -14.5%/h est également observée.

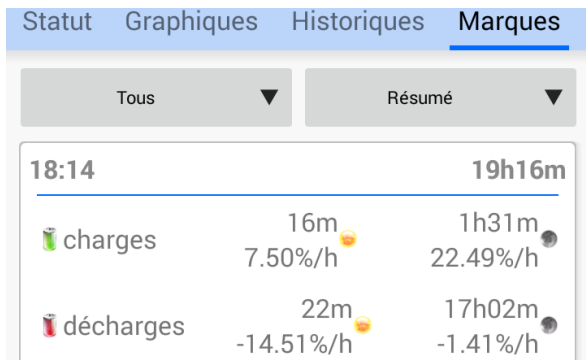


Figure 6: valeurs moyennes de charge et décharge obtenues avec l'historique de l'application

On peut observer sur la figure 7 le graphique présentant l'évolution du pourcentage par heure d'utilisation relative à la figure 2 ce qui permet de faire une estimation rapide du temps de décharge ou de charge.

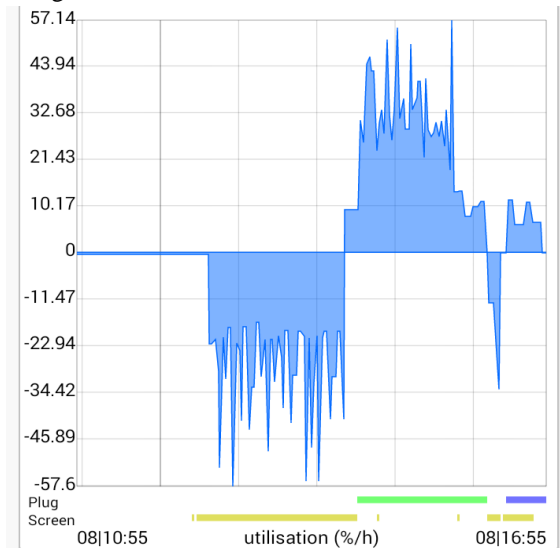


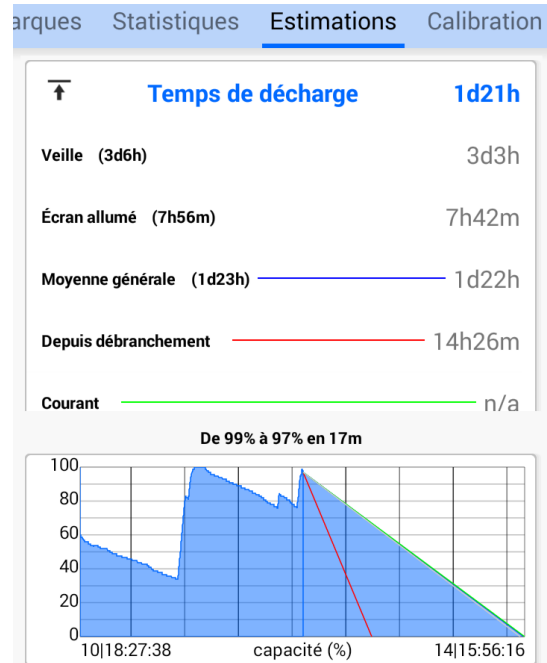
Figure 7 : Evolution du pourcentage par heure en fonction du temps

24) A partir de l'estimation de consommation avec un taux de 14%/h (écran allumé), effectuer le calcul du temps de décharge de 100 % de la capacité énergétique.

Réponse : estimation de décharge :

$$\text{Temps décharge} = 100\% / 14\%/h = 7.5h.$$

C'est bien le temps donné sur les figures 8, tirées de l'application. D'où les deux pentes sur le graphique de la décharge ci-dessous :



L'application indique aussi le temps de charge en fonction du type de recharge effectuée (figures 8).

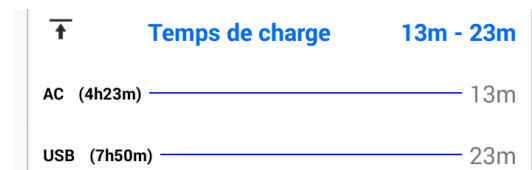
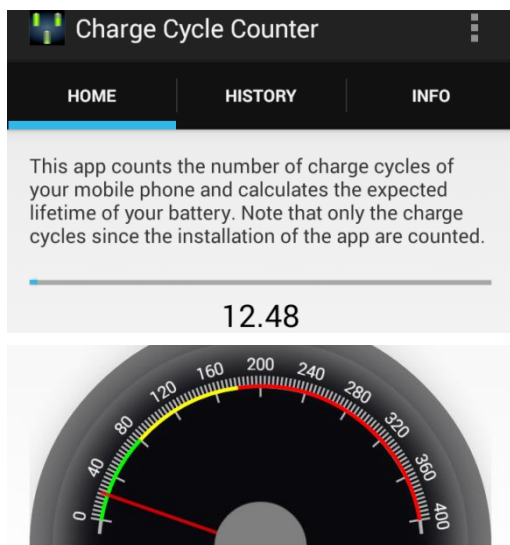


Figure 8 : estimateur décharge et charge en temps réel à partir de la capacité existante

L'application précédente ne compte pas le nombre de charges et de décharges, ni la somme des A.h. ce qui permettrait de faire un bilan et une estimation statistique de la durée de vie de la batterie. 750 cycles de charge à 100% sont souvent annoncés par les constructeurs.

L'application « *charge cycle* » (figure 9) donne les pourcentages de recharge cumulés : 12.48% depuis que l'on a téléchargé l'application (30 jours).



This speedometer shows you how many percent your mobile charged today. If the needle is in the

Figure 9 : addition du travail de la batterie : 12.48% en 30 jours, avec gauge de la recharge journalière (22%)

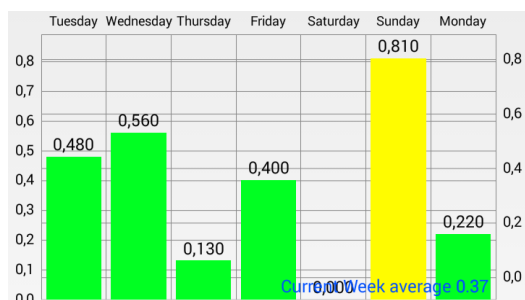


Figure 10 : historique de la recharge journalière avec une valeur moyenne de la consommation de 37%/semaine

La jauge de la figure 10 indique le taux de recharge journalier. Entre 0% et 80%, celui-ci est considéré comme normal (en vert), puis il est considéré comme important jusqu'à 180% (en jaune), puis excessif (en rouge). Dans le menu historique, on peut observer la valeur de la recharge en % par jour ainsi que la valeur moyenne par semaine ce qui reflète l'utilisation.

Cette application indique aussi le coût énergétique de l'utilisation du smartphone. Pour cela, il faut indiquer le coût du kW.h (0,12 €/kW.h) dans le menu "general settings" de l'application.

- 25) Calculer la consommation annuelle du *smartphone* pour une consommation moyenne de 100%/jour et une capacité énergétique de 9.5W.h/jour.

Réponse :

- 26) Le coût de la consommation énergétique est négligeable mais il ne tient pas compte du rendement du chargeur qui est de l'ordre de 70% (5,6W sous 230V pour un facteur de puissance de 0,9 / 5V et 0,8A en sortie). Lorsque le *smartphone* est rechargé à 100% la consommation passe à 0.3W. Recalculer le coût total annuel.

Réponse :

Si on laisse le chargeur dans la prise continuellement, les 0,3W correspondent à une consommation quotidienne de :

$$0,3W \times (24h - 2h) = 6,6 W.h$$

Pratiquement autant que la charge de la batterie !

Si on multiplie cette consommation par 30 millions de *smartphones* en France, on ne peut pas négliger ce résultat !

- 27) Avec une consommation de 37% par jour, quelle est la durée de vie estimée de la batterie sachant qu'elle est censée pouvoir effectuer un cumul de 750 cycles de charges à 100% ?

Réponse :

$$\text{Durée (jour)} = 750 \times 100\% / 37\% = 2027 \text{ jours}$$

Mais ce calcul n'est pas valable car la durée de vie dépend de la température de la batterie (très froide ou très chaude), du temps où la batterie est restée à un niveau de charge affiché inférieur à 0%... En effet, la durée de vie de la batterie va dépendre des quantités d'énergie stockée et rendue mais aussi des profondeurs de décharge, de la tension maximale de charge, de la température d'utilisation et de la composition chimique adoptée par le constructeur de la batterie...

- 28) Est-ce que diminuer la consommation de la batterie (donc fermer toutes les applications et notifications énergivores non directement utiles) permet d'augmenter la durée de vie de la batterie ?

Réponse :

Oui, car la batterie est moins sollicitée. Cependant, elle vieillit avec le temps même si elle n'est pas utilisée. C'est ce que l'on appelle le vieillissement calendaire.

8. Batteries et convertisseurs externes

Le magazine « *Que Choisir ?* » de juin 2016 [10] montre que la capacité énergétique indiquée sur les batteries externes avec sortie USB est réellement d'environ 76% de celle indiquée (Cf. figure 11). De plus, on peut observer que pour ce magazine, la mesure de la résistance interne de la batterie, le taux d'auto-décharge, la masse, le volume sont également considérés comme des paramètres cruciaux pour un système nomade.

Figure 11 : tableau comparatif de batteries externes avec USB 3.0 (magazine « Que choisir ? »)

29) Pourquoi y a-t-il une aussi grande différence entre la capacité annoncée en A.h et la capacité réelle de la batterie annoncée par le constructeur ?

L'équation (9) ci-dessous permet-elle de justifier cet écart avec un rendement du convertisseur de 85%, une tension batterie de 3,7V et une sortie USB à 5V pour la batterie Sony CP-V5A de 5A.h (figure 11) ?

$$Ca_{réelle} = Ca_{annoncée} * rendement * tension_{batterie} / tension_{USB}$$

Faire l'application numérique pour la batterie Sony de 5A.h testée :

Réponse :

$$Capacité = 5A.h * 0,85 * 3,7V / 5V = 3.145 A.h$$

L'essai donne 3,125A.h ce qui est correct mais la recharge du smartphone sera bien de 5 A.h au rendement près du convertisseur et du chargeur.

Donc l'écart de 76% entre la capacité énergétique de la batterie et celle indiquée correspond à la différence entre la valeur de la tension batterie et la valeur de la tension USB.

30) Vérifier la valeur de la capacité énergétique (14,9W.h) de cette batterie externe à partir de l'équation précédente et ce, avec un courant de décharge de 0,5A pendant 10 heures et une résistance de 0.4Ω (12) :

Réponse :

$$Ca = Ca_{annoncée} * tension_{batterie} * rendement - R_{batterie} * I_{decharge}^2 * t$$

Exemple :

$$capacité = 5A.h * 3.7V * 0.84 - 0.4 * 0.5^2 = 15.5 W.h - 1W.h = 14.5W.h,$$

ce qui correspond à la mesure effectuée par le magazine « Que choisir ? ».

Remarque : l'énergie perdue dans la résistance interne de la batterie est négligeable par rapport à l'énergie de la batterie.

31) Ces batteries externes sont essentiellement composées d'éléments de type 18650 (18 mm de diamètre, 65 mm de long et de masse 50 g) comme on peut l'observer sur la figure 12.



Figure 12 : USB Power Bank avec éléments 18650

Or, il y a de grosses différences de capacité entre ces éléments [12] et les capacités énergétiques annoncées sur les sites de vente en ligne [13]. Rechercher quelle est la capacité énergétique approximative d'un élément 18650 ?

Réponse :

entre 1,5A.h et 3A.h, donc entre 7W.h et 11,4 W.h D'où la différence de capacité entre les éléments testés précédemment.

32) Par conséquent, à partir de la masse et du volume, il est possible de connaître approximativement la capacité énergétique de la batterie externe. Quelle est la différence de masse entre les batteries Sony de capacités 5A.h et 3A.h ? Comparer ces masses par rapport à la masse de votre smartphone.

Réponse :

137g pour la 5A.h (2 éléments) et 87 g pour la 3A.h (1 élément). Le boîtier externe n'est pas négligeable. Le Xperia Z3 ne pèse que 152g. La batterie représente ¼ de son poids.

33) Au niveau de la connectique USB, des mesures peuvent être effectuées avec un « USB meter » (figure 13) qui ne coûte qu'une dizaine d'euros et qui permet de mesurer le courant, la tension et la capacité énergétique.



Figure 13 : PowerJive USB Power Meter

A partir de l'application « Battery Monitor » précédente, il est également possible de tester ces batteries externes. Mais, pourquoi faut-il que l'écran soit éteint lors de la mesure de la capacité de la batterie externe ?

Réponse :

à cause de l'équation (4). En effet, l'application ne prend en compte que le courant qui va à la batterie et pas le courant utilisé par le *smartphone*. Il y aura donc une différence de capacité énergétique si l'écran consomme de l'énergie.

9. Conclusions

Il faut un minimum de connaissances pour faire le diagnostic d'une batterie et faire des choix. Les 2 applications présentées ne sont pas compréhensibles par de simples utilisateurs de *smartphone*.

Pourtant, même s'il n'est pas très compliqué de savoir si l'autonomie a baissé à cause d'une application énergivore ou si c'est la batterie qui « ne tient plus la charge », cela peut prendre du temps pour comprendre les éléments physiques mis en jeu. De plus, les applications manquent souvent d'explications malgré la présence de certains tutoriels.

Ce sont souvent les passionnés et certains forums en ligne qui communiquent les informations utiles et non les constructeurs. Cependant, le manque de rigueur des exposés lus sur ces sites ne rend pas toujours l'information fiable.

Quelque soient les types de batterie ou quelque soient les constructeurs, sous l'*OS Android 6*, le nombre de cycles n'est pas enregistré par un circuit intégré. Il en est de même pour le nombre d'A.h consommés, pour les profondeurs de décharge permettant d'effectuer un bilan, pour l'âge de la batterie et son état de santé. En revanche, sous l'*OS Android*, de nombreuses applications permettent de mieux gérer et d'augmenter la durée de vie d'une batterie mais elles ne sont généralement pas rigoureuses ni entièrement abouties.

En revanche, sur un *OS d'iPhone*, toutes ces données sont conservées et envoyées à un gros serveur (surnommé « *Big DATA* »). La marque Apple réalise ainsi des études pour mieux gérer les batteries, en limiter la maintenance et mieux satisfaire ses clients. Notons d'ailleurs que la tension maximale sur ses *iPhone* est de 4.2V au lieu de 4.35V pour de nombreux systèmes sous *OS Android*.

De plus, en fonction de la diversité des constructeurs et de la chimie utilisée, la résistance interne ainsi que la capacité énergétique peuvent varier du simple au double. La détérioration d'une batterie de 20 € (gonflage, échappement d'oxyde...) peut aussi détruire un *smartphone* qui coûte 10 à 25 fois plus cher.

Une durée de vie de la batterie de 2,5 ans est souvent largement suffisante car elle correspond généralement à un changement du *smartphone* en raison de sa soi-disante obsolescence. Cependant la directive européenne de 1999 et la loi française « Hamon » votée

en 2014 et applicable en 2016 obligent les constructeurs à proposer désormais une garantie de 2 ans contractuelle sur tous les appareils numériques et leur batterie. Cette dernière loi oblige les constructeurs à revoir leurs contrats d'extension de garantie et à améliorer la fiabilité de leurs produits. En effet, l'objectif de cette loi est de limiter la surconsommation des consommables et l'accumulation des déchets.

Les *smartphones* des étudiants sont ainsi un excellent support pédagogique pour comprendre techniquement le fonctionnement des batteries. L'étude de ce fonctionnement peut aussi les motiver à avoir un regard critique sur l'impact des batteries sur leur budget. Cette étude peut enfin leur permettre d'appréhender l'empreinte écologique de ces batteries sur notre planète.

Références

1. https://fr.wikipedia.org/wiki/Consommation_%C3%A9nerg%C3%A9tique_d%27un_smartphone
2. S.Tarkoma, M.Siekkinen, Y.Xiao « Smartphone Energy Consumption: Modeling and Optimization » Book Cambridge University Press. 2014
3. http://www.frandroid.com/actualites-generales/216462_batterie-devenue-choix-premier-lachat-dun-mobile
4. <http://www.fichier-doc.fr/2016/08/09/smarthphone-mesure-et-gestion-batterie-android-v1/>
5. <https://source.android.com/devices/tech/power/devi ce.html#maxim-fuel>
6. https://fr.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus
7. A.Sivert, F.Betin, B.Vacossin, M.Bosson, T.Lequeu « Etat de santé, diagnostic, durée de vie des batteries Lithium – Application à l'estimation de l'autonomie d'un véhicule électrique » Revue 3EI N°, Avril 2016 11 pages.
8. A. Sivert, F.Betin, T. Lequeu « Instrumentation d'un véhicule motorisé électrique faible consommation de type « éco marathon » Revue 3EI N°81, Juillet 2015
9. <http://pccollege.fr/troisieme-2/chimie-3eme/chapitre-vi-les-piles/>
10. <https://www.quechoisir.org/guide-d-achat-batterie-externe-n10909/>
11. http://www.frandroid.com/produits-android/smartphone/279495_quick-charge-fast-charge-vooc-comparatif-des-solutions-de-rechargement-rapide
12. <http://lygte-info.dk/review/batteries2012/Common18650Summary%20UK.html>
13. <http://velorizonta.bbfr.net/t21362-velomobile-electric-leiba-x-stream-iut-aisne-suite>

Le numéro 0 de la Revue 3EI

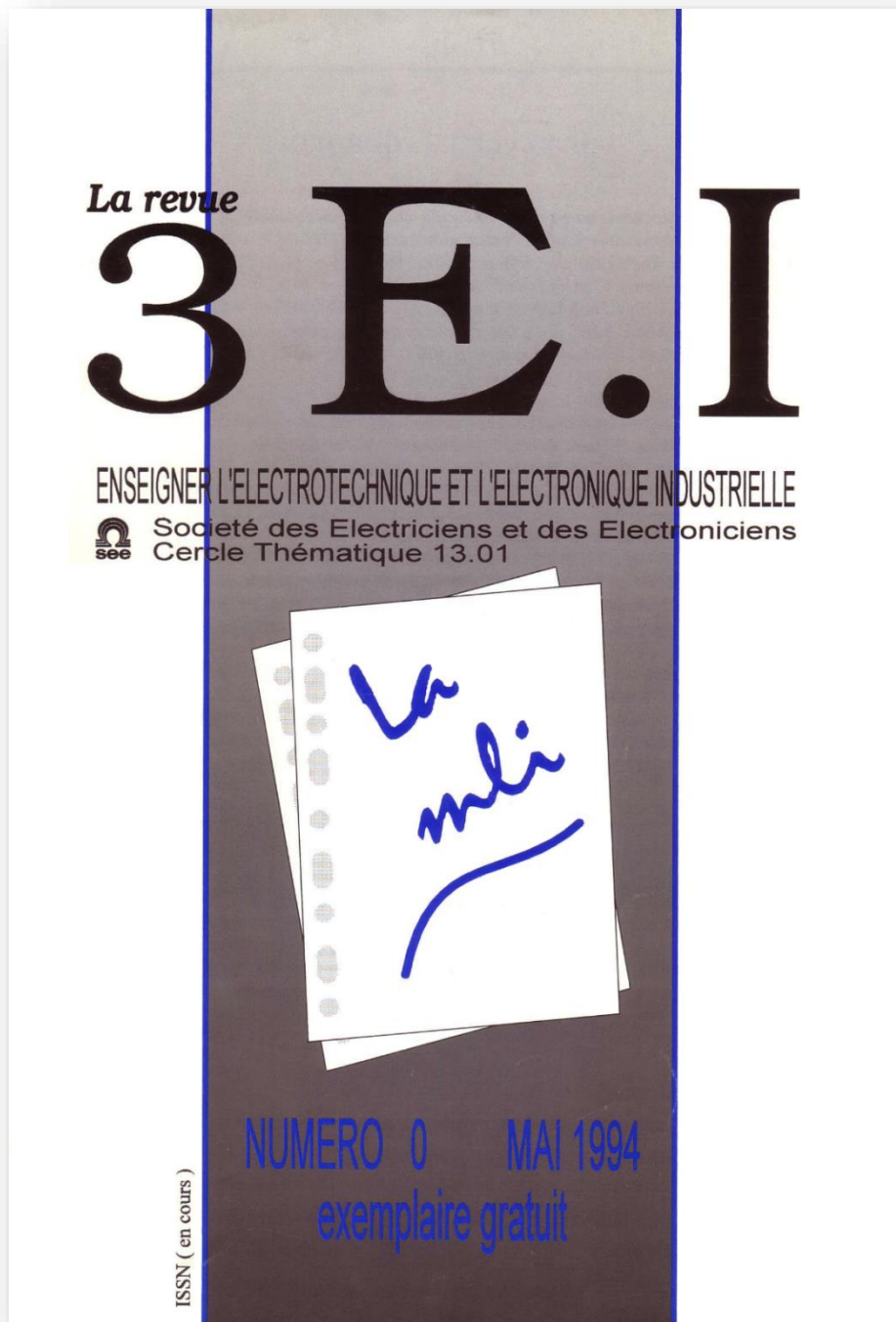
Jean-Michel GAY, Jean-Philippe ILARY et Franck LE GALL

Pour La Revue 3EI

Résumé : C'est en mai 1994, qu'un petit groupe de collègues a publié le numéro 0 de La Revue 3EI. Le début d'échanges techniques et pédagogiques demandés par un grand nombre d'enseignants commençait.

En hommage à ces courageux pionniers, nous republions certains articles de ce premier numéro. Pour commencer, ci-dessous quelques pages comme la couverture, l'éditorial et le sommaire. Ensuite, pour débiter, l'article d'Alain CUNIERE et Jean-Luc EOUZAN qui décrivaient leur travail réalisé avec leur section de TS Electrotechnique, est réédité.

1. Première de couverture de la Revue 3EI n°0



2. Deuxième de couverture

UNE REVUE 3EI POURQUOI ?

J'ai remarqué que dans les pays où l'industrie du génie électrique était dynamique, et génératrice d'un solde très positif à l'exportation (exemple : Suisse- Allemagne- Suède), la formation de l'ensemble des acteurs de ces industries, et particulièrement celle des techniciens représentait un domaine essentiel. Dans ces pays le technicien a des Responsabilités notables, et il joue un rôle clef dans le développement industriel. Dans les pays où l'industrie est faible, il y a des ingénieurs avec une solide formation, mais pas ou peu de techniciens, et leur formation est négligée.

Nous commençons à sentir la concurrence des pays d'Asie (Taiwan - Corée - Chine - Malaisie), et ce que nous voyons aujourd'hui ne représente qu'une petite partie de ce qui nous attend comme la face émergée de l'iceberg n'en représente pas le volume réel. Comment l'industrie française du Génie Electrique pourra-t-elle faire face à cette situation ? En augmentant notre potentiel de formation, (Enseignement et formation continue). La première richesse de l'industrie ce sont les hommes qui y travaillent, et c'est par eux que nous pourrions créer les emplois qui nous manquent.

La création de la revue 3EI est donc un événement de première grandeur dans le paysage du Génie Electrique français. Je souhaite que ce soit une occasion d'échanges entre industriels et enseignants, mais aussi un outil de réflexion sur l'évolution de la formation.

Nous sommes prêts à y collaborer activement.

Jean - Marie PETER

Président du club 13 SEE

3. Bulletin d'abonnement (page 59) présent dans la revue 3EI n°0

CONDITIONS D'ABONNEMENT

Nous proposons la parution de trois numéros par année scolaire, en décembre, mars et juin. Chaque numéro se présentera sous un format A4 de 48 pages environ, dans une couverture bi-couleur d'un grain supérieur.

Un devis d'imprimerie et de routage, basé sur une parution de 1000 exemplaires, et prenant compte des frais d'affranchissement, a conduit au tarif d'abonnement de 120F pour une année scolaire, soit trois numéros.

Pour des raisons d'organisation avec l'imprimeur et le routeur, nous sommes contraints à l'aménagement suivant du principe d'abonnement. Il sera individuel et compté pour une année scolaire complète.

La date butoir du premier novembre de l'année scolaire en cours clôturera la possibilité d'abonnement pour celle-ci. Tout bulletin d'abonnement reçu après cette date sera automatiquement considéré pour l'année scolaire suivante.

La parution de cette revue est possible grâce au cercle thématique 13.01 du club 13 de la SEE. Les abonnements seront payés par chèque à l'ordre de SEE revue 3EI.

BULLETIN D'ABONNEMENT

Adressé à : lycée Pierre de Coubertin
Revue 3EI
Chaussée de Paris
77109 MEAUX

1) bulletin d'abonnement accompagné d'un chèque de 120F à l'ordre de **SEE Revue 3EI** pour les numéros 1,2,3 de l'année scolaire 94/95.

2) pour des raisons techniques, passé la date du 1/11/1994, ce bulletin sera valable pour les numéros 4,5,6 de l'année scolaire 1995/1996.

Nom:..... Prénom:.....
Etablissement:.....
Adresse:.....
Code postal:..... Ville:.....
Fonction:.....

4. Pages 1 et 2 de la revue n°0 : Editorial

Chers futurs abonnés.

Pourquoi cette " **Revue 3EI** ", quels en sont les objectifs ?

Depuis une vingtaine d'années l'Electrotechnique subit une évolution très rapide.

L'électronique de puissance fait son apparition d'abord dans le domaine des convertisseurs alternatif - continu puis continu - continu ; associée à une électronique de commande, les performances des systèmes sont accrues grâce aux asservissements. Les composants évoluent, en premier lieu avec le développement des transistors bipolaires puis MOS, aujourd'hui IGBT... Le domaine de l'électronique de puissance atteint celui des convertisseurs continu - alternatif ; la variation de vitesse est aussi le domaine des machines alternatives. Parallèlement, l'électronique numérique progresse, les micro-processeurs et micro-contrôleurs gagnent en rapidité et en puissance, avec pour effet la réalisation de commandes plus élaborées et par conséquent de rendre les commandes de machines plus performantes.

Toute cette (r)évolution en quelques années !

Le professeur enseignant l'électrotechniques se heurte chaque jour à de nouvelles difficultés ; son domaine ne peut plus se limiter à l'étude de la machine, celle-ci ne pouvant plus être dissociée de son convertisseur, lui-même associé à son électronique de pilotage aujourd'hui numérique !

Le professeur formant des techniciens au niveau Bac + 2 doit faire évoluer son enseignement régulièrement et très vite. Comment peut-il assumer seul cette délicate mission ? L'objectif des **journées "3EI"** organisées par la **SEE** et les **MAFPEN** est de leur apporter une aide pédagogique grâce à la possibilité d'échange de méthodes de travail, aussi bien théoriques qu'expérimentales. En mars 93 pour la première fois, dans les locaux de **l'école SUPELEC**, sur la commande des machines asynchrones, plus de 400 participants se trouvèrent rassemblés ; en 95 le thème des machines synchrones dans ses divers domaines d'applications, technologie, commandes, devraient connaître un succès comparable.

Un moyen supplémentaire favorisant les échanges pédagogiques entre les enseignants apparaît indispensable. **La Revue "3EI"**, outil du cercle thématique 13-01 de la **SEE**, a cet objectif ambitieux.

Cette revue n'existera que grâce aux articles que fourniront leurs auteurs ; il est à souhaiter que ceux-ci soient nombreux. Il est important qu'Universitaires, Industriels, Professeurs de BTS et IUT participent ensemble à la fourniture de ces textes afin d'enrichir cet échange. Dès l'annonce du projet, nombre d'entre eux répondirent très vite, favorablement, les articles proposés dans ce n°0 en sont la preuve.

Il faut faire connaître la Revue "3EI" dès sa naissance, au plus grand nombre. C'est pour cette raison qu'elle est envoyée **gratuitement à 1000 professeurs** ou personnes liées à l'enseignement de l'électrotechnique. Pour y parvenir il fallait de l'argent et nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué par leur aide financière à ce travail.

Nous remercions Mme **BICHON LHERMITTE**, conseillère technologique pour l'Île de France du réseau **NOVELECT**, de la confiance et du soutien qu'elle nous a accordé. Carrefour permanent des entreprises, des laboratoires de recherche et des écoles confrontés aux technologies et applications nouvelles liées à l'électricité, **NOVELECT** agit pour le compte d'EDF et du ministère de l'enseignement et de la recherche.

Nous remercions Mrs **FOREST** et **GUILLOSSOU**, professeurs responsables de la préparation au CAPET de génie électrique à **l'IUFM de Cachan**. Très concernés par l'enseignement du génie électrique, nos collègues ont également contribué à nous motiver davantage dans cet engagement.

Nous remercions Mr **LEMAIRE**, proviseur du **lycée Pierre de Coubertin à Meaux**. Persuadé des retombées pour les étudiants, il a réussi, d'un budget toujours insuffisant, à contribuer à la création de la revue.

Nous espérons que cette revue devienne un véritable outil de communication entre enseignants, où chacun fera part de son expérience pédagogique et technique sur un sujet lié à l'électricité. Aussi, nous proposons le lancement de numéros à thème avec l'espoir de lire une leçon, un rapport d'expérimentation, un compte-rendu d'étude, une expertise d'un matériel industriel, ou toute forme écrite de nature à favoriser la compréhension du sujet étudié et ainsi en faciliter son enseignement. Néanmoins, dans un souci d'ouverture chaque numéro se verra enrichi des propositions de collègues souhaitant s'exprimer sur d'autres thèmes que ceux proposés.

Certains d'entre vous reconnaîtront par notre initiative, une ressemblance avec celle de notre collègue Mr **BORNAND*** du **Lycée Franklin à Orléans**, fondateur en 1973 du bulletin de liaison des professeurs du technique supérieur en EEA. Pionnier en la matière, il coordonna seul jusqu'en 1984 la parution de ce bulletin. Reprise par Mme **RIBIERE** et Mr **RICHARD** du **lycée Raspail de Paris**, la parution cesse fin des années 80.

Pour notre part, nous souhaitons nous restreindre à la science de l'électrotechnique et à l'incontournable électronique industrielle, moteur du développement continue de cette science. Si vous en manifestez le besoin, nous inclurons dès le n°1, une page "service lecteurs" sur laquelle nous publierons vos annonces de recherche du composant introuvable de dossiers techniques, de logiciels...

L'avenir de cette revue est désormais entre vos mains. Fondée sur un principe mutualiste, elle ne vivra que grâce à celles et ceux qui, par leurs écrits contribueront à sa pérennité.

5. Sommaire de la revue 3EI n°0

La Revue 3EI	Sommaire
<p>Responsables de la publication: Alain Cunière (Meaux) Gérard Delavier (Nogent/Marne)</p> <p>Equipe de rédaction: Jean Louis Bianchi (Versailles) François Boucher (Argenteuil) Gilles Feld (St Denis) M. Michèle Lebihan (Versailles)</p>	<p>p. II Présentation de Monsieur Jean Marie Peter <i>président du club 13 de la SEE</i></p> <p>p. III Sommaire</p> <p>p. IV Appel à articles</p>
<p>Comité de lecture: Jean Paul Caron (ENSAM Lille) François Forest (LESIR Cachan) Claude Lavabre (ENS Cachan) Jean Marie Peter (SEE)</p>	<p>p. 1 Editorial <i>par A. Cunière (Meaux) et G. Delavier (Nogent/Marne)</i></p> <p>p. 3 le pont monophasé de commutation;fonction onduleur <i>par J.P. Caron et J.P. Hautier (ENSAM-L2EP Lille)</i></p>
<p>Articles envoyés à: La Revue 3EI lycée Pierre de Coubertin chaussée de Paris 77109 Meaux</p>	<p>p. 20 Panorama de la vitesse variable et de sa commande numérique <i>par J. Dhers (directeur technique,Cegelec Belfort)</i></p> <p>p. 29 Conversion continu/alternatif pour alimentation ininterrompible <i>par A. Cunière et J. L. Eouzan (Meaux)</i></p>
<p>La Revue 3EI n'est pas solidaire des opinions émises par les auteurs d'articles.Celles-ci n'engagent que la seule responsabilité de leurs auteurs.</p>	<p>p. 38 Machine asynchrone triphasée alimentée par un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions <i>par C. Moëtus et J. M. Nouvellon (Fort de France)</i></p> <p>p. 45 Réalisation de bras d'onduleur à transistors MOS ou IGBT <i>par P. Desne et L. Perrochon (Argenteuil)</i></p>
<p>Abonnements pour l'année scolaire 1994/1995: 120 F les 3 numéros.</p>	<p>p. 49 Une approche de la modulation de largeur d'impulsions en BTS <i>par G. Delavier (Nogent sur Marne)</i></p>
<p>Imprimerie IBC 78-83 rue des frères Lumière ZI des Chanoux 93330 Neuilly sur Marne</p>	<p>p. 59 Fiche d'abonnement</p>

6. Appel à article présent dans le numéro 0

APPEL A ARTICLE

Chers collègues, cette revue ne vivra que grâce à **notre effort collectif**. Plus nous serons nombreux à participer à son contenu, plus la revue s'enrichira d'idées nouvelles pour l'intérêt de tous. Nous proposons la parution de numéros à thèmes dans lesquels leçons, projets, expérimentations, études théoriques, réflexions d'enseignants et d'industriels seront proposés.

Thèmes des trois premiers numéros :

Les numéros suivants porteront sur :

- | | | |
|--|----------|------|
| 1 : La machine asynchrone..... | décembre | 1994 |
| 2 : Association convertisseur statique-machine asynchrone..... | mars | 1995 |
| 3 : La machine synchrone..... | juin | 1995 |
| 4 : Réseaux d'énergie (absorption sinus, filtrage actif, cos phi, protections, distribution,...) | 12/95 | |
| 5 : Electrothermie (chauffage par induction, par résistances, régulations,...) | 03/96 | |
| 6 : La commutation douce | 06/96 | |

La parution de numéros à thème constitue une entreprise périlleuse pour la recherche d'articles. Aussi, selon le volume d'articles collectés pour chaque numéro et, afin que chacun puisse s'exprimer sur le sujet qui lui est cher, nous proposons soit régulièrement, soit par numéro supplémentaire, d'éditer d'autres thèmes traités par les collègues souhaitant contribuer au développement de la revue, sans être nécessairement experts de ceux proposés.

Propositions d'articles :

Les numéros 1, 2, 3 sont en préparation. Si certains souhaitent déjà contribuer au lancement de la revue par un article, nous nous ferons un plaisir de le publier.

Pour les numéros 4, 5, 6, toutes les propositions sont les bien venues.

Les articles doivent être envoyés au plus tard deux mois précédant la parution à l'adresse suivante :

**lycée Pierre de Coubertin
la Revue 3E.I
chaussée de Paris
77109 Meaux**

Les articles devront être rédigés soit sur papier A4 (7 pages maximum) en laissant un contour libre de 15 mm; soit sur une disquette lisible par le logiciel Word sous Windows. La numérotation des pages sera faite par l'imprimeur.

Soucieux que la revue devienne un véritable outil de communication, nous sommes ouverts à toutes propositions dans l'esprit 3E.I.

**LES PROCHAINES JOURNEES 3EI 95
SERONT ORGANISEES LES 30 ET 31 MARS 1995
A SUP'ELEC PAR LA SEE ET LES MAFFEN
SUR LE THEME DE LA MACHINE SYNCHRONE
(constitution, commande, applications)**

CONVERSION CONTINU/ALTERNATIF POUR ALIMENTATION ININTERRUPTIBLE

Alain CUNIERE – Jean-Luc EOUZAN

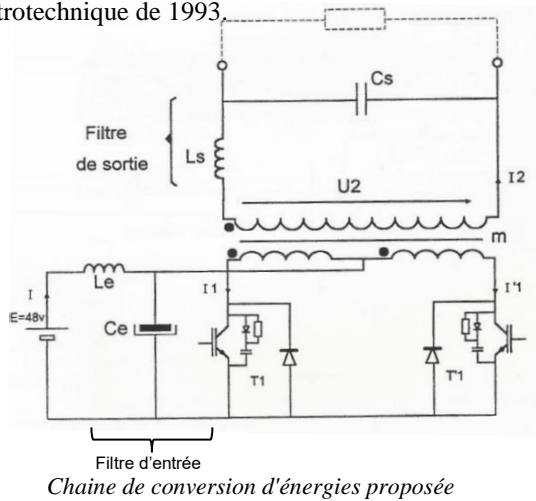
En 1994 : Lycée Technique Pierre de Coubertin
Chaussée de Paris - 77109 MEAUX

Résumé : Cet article, extrait du numéro 0 de la Revue 3EI, présente une activité de projet en STS Électrotechnique session 1993. Cette pratique du référentiel amenait un groupe d'étudiants (de 2 à 4) à réaliser dans son intégralité un produit d'électronique de puissance de type alimentation à découpage, variateur de fréquence etc...

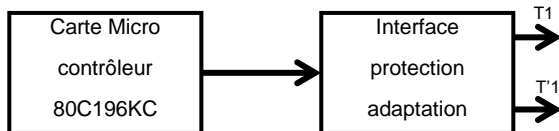
Lors de la réforme de 2008, l'approche en projet a changé, et il a été demandé aux étudiants d'avoir une démarche plus « d'assemblé » que de bureau d'étude.

6. INTRODUCTION

Évaluation d'un projet conçu et réalisé par trois étudiants dans le cadre de l'obtention du BTS électrotechnique de 1993.



Chaîne de conversion d'énergies proposée



Architecture de la commande

Technique de modulation : Nous avons retenu l'utilisation d'une table d'angles pré calculée, pour trois raisons.

La première repose sur une meilleure compréhension de cette technique par nos étudiants. La justification mathématique du spectre de l'onde peut être menée par un calcul classique de séries de Fourier. Sous cet aspect, la MLI (porteuse triangulaire/modulante sinusoïdale) régulière est très difficile d'accès.

La seconde, concerne la synthèse du problème par un micro- contrôleur. Aisée s'il s'agit d'une lecture de table ; difficile s'il s'agit de calculer en temps réel les instants correspondant aux intersections triangle/sinus, pour lesquels les problèmes de signe, d'arrondi, de débordement, de facteur d'échelle sont à résoudre numériquement.

La troisième, pour l'exploitation des moyens informatiques mis à la disposition des étudiants, tels que :

- un logiciel de maths pour le calcul des angles.
- un logiciel d'analyse spectrale pour les tracés du spectre.

7. MLI PRÉ-CALCULÉE

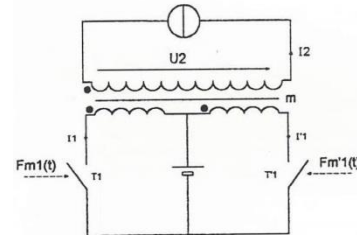


Schéma équivalent simplifié à l'échelle des commutations.

Bilan des ampère-tours :

$$N_1 I_1 - N_1 I_1' - N_2 I_2 = 0$$

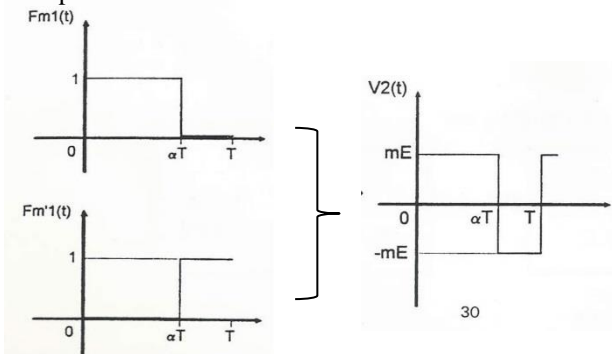
→ au moins un des deux interrupteurs doit être fermé à chaque instant.

Bilan des tensions

$$\left. \begin{aligned} V_{T1} &= V_1 + E \\ V_{T1} &= E - V_1' \end{aligned} \right\} V_{T1} + V_{T1'} = 2E + V_1 - V_1' = 2E$$

→ au plus un des deux interrupteurs doit être fermé à chaque instant.

Les deux commandes sont donc exactement complémentaires.



On peut assimiler ces commandes à deux fonctions de modulation : $F_{m1}(t)$ et $F_{m'1}(t)$.

Avec $F_{m'1}(t) = 1 - F_{m1}(t)$

On peut donc écrire :

$$V_2(t) = mE [F_{m1}(t) - F'_{m1}(t)]$$

$$V_2(t) = mE [2 F_{m1}(t) - 1]$$

D'autre part, la tension moyenne au secondaire du transformateur doit être nulle afin d'éviter la saturation de celui-ci :

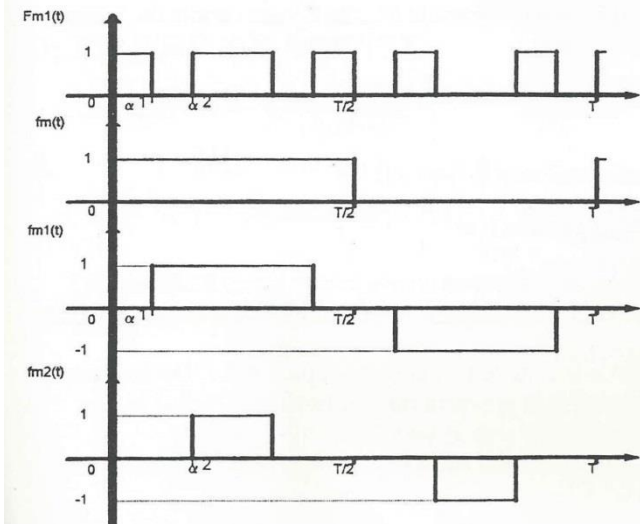
$$\langle V_2 \rangle = mE [2 \langle F_{m1}(t) \rangle - 1]$$

$$\langle V_2 \rangle = 0 \Rightarrow 2 \langle F_{m1}(t) \rangle - 1 = 0 \Rightarrow \langle F_{m1}(t) \rangle = 1/2$$

Si l'on décompose la fonction $F_{m1}(t)$ en une somme des fonctions $f_{mi}(t)$, et conservant la valeur moyenne, alors la fonction de modulation $F_{m1}(t)$ s'écrit finalement:(biblio 1) :

$$F_{m1}(t) = f_m(t) + \sum_{i=1}^M (-1)^i f_{mi}(t)$$

On appelle M le nombre de trous dans la fonction $F_{mi}(t)$ par demi-période.



Excepté pour le fondamental, la relation montre que M harmoniques du spectre peuvent être supprimés de la série.

La résolution du système de M équations non linéaires nécessite un logiciel.

Les étudiants ont obtenu sur Eureka pour M = 5 :

- $\alpha_1 = 10,68^\circ$
- $\alpha_2 = 26,39^\circ$
- $\alpha_3 = 32,28^\circ$
- $\alpha_4 = 52,39^\circ$
- $\alpha_5 = 54,54^\circ$

L'utilisation du logiciel d'analyse spectrale Fourier a ensuite permis aux étudiants de vérifier effectivement l'élimination du spectre de $V_2(t)$ des raies 3, 5, 7, 9, 11.

$$F_{m1}(t) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1,3,5} \frac{2}{n\pi} \left[1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^M (-1)^i \cdot \cos(n\alpha_i) \right] \sin(n\omega t)$$

$$V_2(t) = \sum_{n=1,3,5} \left[4mE \left[1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^M (-1)^i \cdot \cos(n\alpha_i) \right] \frac{\sin(n\omega t)}{n\pi} \right]$$

8. FILTRE D'ENTRÉE

Les transitions du courant de la source continue, consécutives à l'alimentation d'un onduleur de tension nécessitent une source capacitive : La présence du filtre Le Ce est donc indispensable.

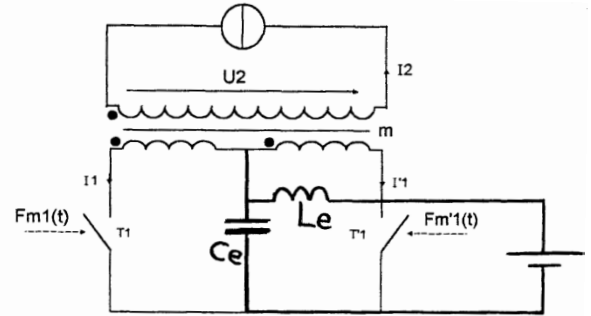
$$i_e(t) = i_1(t) + i'_1(t)$$

$$i_1(t) = m F_{m1}(t) \cdot i_2(t)$$

$$i'_1(t) = -m F'_{m1}(t) \cdot i_2(t)$$

$$F'_{m1}(t) = 1 - F_{m1}(t)$$

$$\Rightarrow i_e(t) = m [2 F_{m1}(t) - 1] \cdot i_2(t)$$



En considérant le filtre de sortie suffisamment efficace, le courant I_2 sera surtout dû à l'onde fondamentale de $V_2(t)$ de pulsation ω , soit :

$$i_e(t) = \left\{ \sum_{n=1,3} \left[4m \left[1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^M (-1)^i \cdot \cos(n\alpha_i) \right] \right] \sin(n\omega t) \hat{I}_2 \sin(\omega t + \varphi) \right\} / (n\pi)$$

on obtient alors :

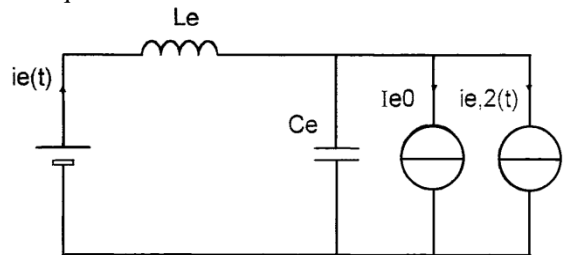
$$i_e(t) = \sum_{n=1,3} A_n \{ \cos[(n-1)\omega t - \varphi] - \cos[(n+1)\omega t + \varphi] \}$$

avec $A_n = 2m\hat{I}_2 [1 + 2 \sum_{i=1}^M (-1)^i \cos(n\alpha_i)] / (n\pi)$

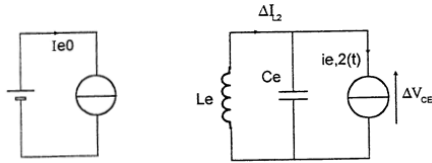
L'utilisation des fonctions de modulation, permettent en très peu de lignes d'exprimer la série de $I_e(t)$. On remarque également que les harmoniques de courant fournis par la source continue sont de rang pair.

Les deux premiers termes non nuls de la série $I_e(t)$ sont obtenus pour $n = 1$. On détermine dans ce cas, la composante continue I_{e0} et la première raie harmonique à 2ω , $I_{e,2}$ la plus difficile à filtrer, (avec $M = 5$, la seconde raie sera de rang 12).

En limitant le développement à ces deux termes, le schéma équivalent devient le suivant :



On peut le décomposer en deux schémas équivalents.

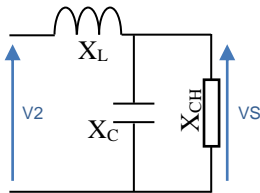


En considérant $\Delta I1 \ll Ie2$, le dimensionnement s'obtient aisément par les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} I_c = C_e \times 2 \times \omega \times \Delta V_c \approx I_{e2} \\ C_e \geq \frac{I_{e2}}{2 \times \omega \times \Delta V_c} \\ \Delta V_c = L_e \times 2 \times \omega \times \Delta I1 \\ L_e \geq \frac{\Delta V_c}{2 \times \omega \times \Delta I1} \end{cases}$$

ΔV_c et $\Delta I1$ étant fixés par le cahier des charges.

9. FILTRE DE SORTIE



Son rôle consiste à laisser passer le fondamental de l'onde MLI, exempt des harmoniques contenus dans cette onde. Il devra donc filtrer dès le rang 13 pour $M = 5$.

Il y a deux façons d'écrire la fonction de transfert de l'ensemble filtre + charge :

$$\begin{aligned} 1) \quad V_s &= V_2 \frac{1}{1 + \frac{X_L}{X_C} (1 + \frac{X_C}{X_{CH}})} \\ 2) \quad V_s &= V_2 \frac{X_C / X_L}{1 + \frac{X_C}{X_L} (1 + \frac{X_L}{X_{CH}})} \end{aligned}$$

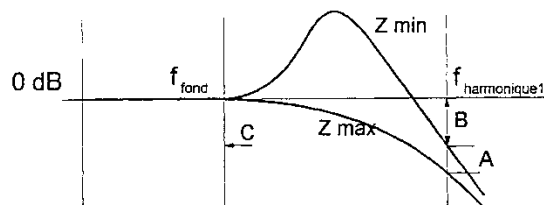
Ces deux égalités font apparaître deux moyens de rendre V_{sf} peu sensible à la charge, soit :

$$\frac{1}{C_s \omega} \ll X_{CH} \quad L_s \omega \ll X_{CH}$$

Si la condition 1 est vérifiée pour le fondamental, elle le sera aussi pour les harmoniques 13, 15 ... donc, le résidu harmonique sur V_s sera peu influencé par la charge.

Si la condition 2 est vérifiée pour le fondamental, les harmoniques de tension chutés sur cette inductance alors de faible valeur, engendreront des harmoniques de courant dangereux pour les interrupteurs. Nous retiendrons la condition 1.

Le diagramme de BODE associé fournit les contraintes technologiques de dimensionnement de L_s et C_s .



A: insensibilité de l'atténuation du premier harmonique avec la charge.

B: niveau de l'atténuation du premier harmonique.

C: maintenir $(V_s)_{eff}$ peu différent de $(V_s)_{f}$ quelque soit la charge.

Fixons la contrainte A par la condition :

$$\begin{aligned} \frac{1}{13 C_s \omega} &= \frac{5}{100} X_{CHmin} \quad \text{avec} \quad X_{CHmin} = \frac{V_s^2}{P_{max}} \\ \Rightarrow C_s &= \frac{20 \cdot P_{max}}{13 \cdot \omega \cdot V_s^2} \end{aligned}$$

Ainsi l'atténuation A_{13} du premier harmonique s'écrit :

$$A_{13} = 13^2 \cdot \omega^2 / \omega_0^2 - 1$$

avec $L_s C_s = \frac{1}{\omega_0^2}$

A priori l'on peut choisir ω_0 pour obtenir l'atténuation désirée et ainsi fixer la contrainte B. Néanmoins, ce choix est limité par la contrainte C, telle que :

$$|X_C / X_L| \ll 1 \quad \text{soit} \quad \omega^2 \cdot L_s \cdot C_s \ll 1$$

D'où $\omega^2 / \omega_0^2 \ll 1$

Associée à la relation précédente, il apparaît une limite, telle que :

$$A_{13} + 1 \ll 13^2$$

Cette relation permet éventuellement de choisir le nombre de commutations onduleur pour des atténuations très fortes. En utilisant la règle du dixième,

$$\begin{aligned} A_{13} + 1 &\ll 169 \quad \Rightarrow \quad A_{13} = 16 \\ \Rightarrow L_s &= \frac{1}{\omega_0^2 \cdot C_s} \end{aligned}$$

10. INTERFACE

Deux fonctions sont dévolues à l'interface commande/interrupteur.

- **une interface logique pour :**

Complémenter la sortie μC , car la commande de T'1 se déduit de celle de T1 par la loi :

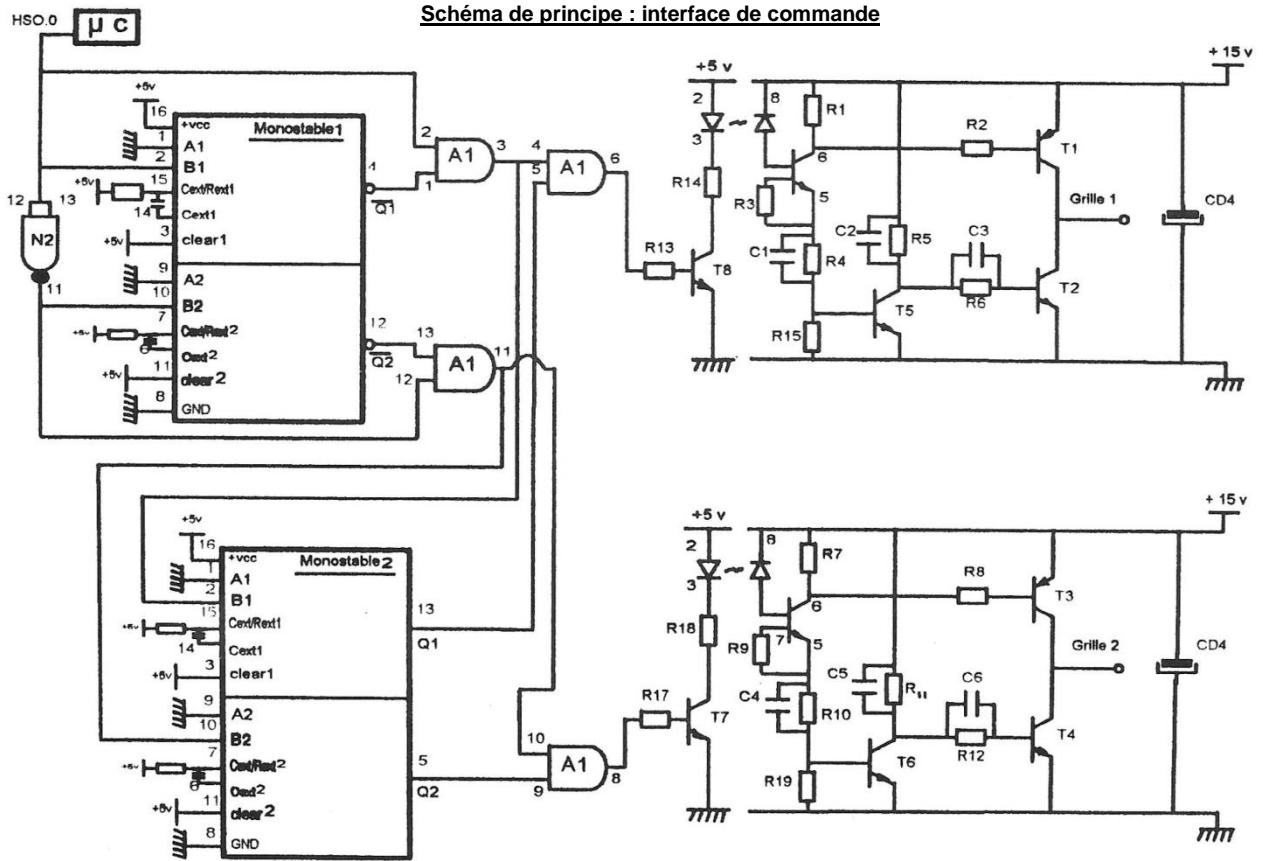
$$F_{m1}(t) = 1 - F_{m1}(t)$$

Créer un temps mort entre les deux commandes par le monostable 1 (anti recouvrement TI/T'1)
Bloquer les deux commandes si la fréquence du signal est trop basse par le monostable 2 (protection sur arrêt du μC)

- **une interface analogique pour:**

Réaliser l'isolation galvanique avec les interrupteurs

Réaliser une attaque basse impédance de la grille des MOS de puissance.



6. COMMANDE

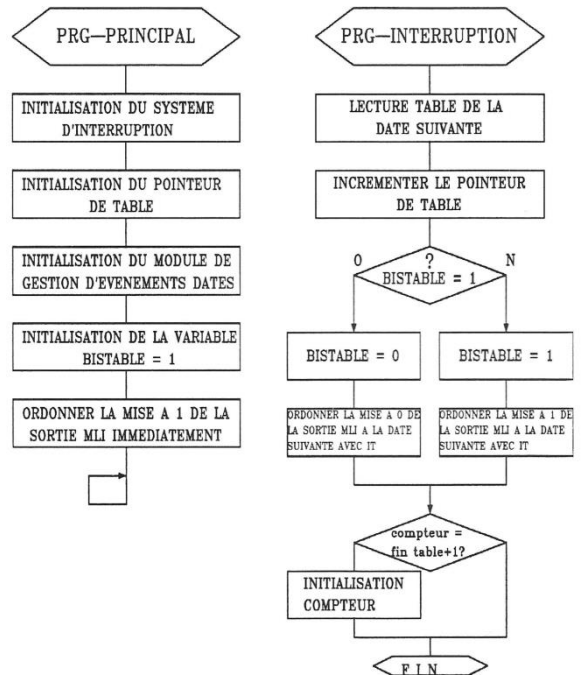
Le µC 80C196KC intègre entre autres choses, un module de commande particulier d'entrées/sorties. Ce module est capable, indépendamment du µC, de gérer des **ordres** (montée/descente d'une sortie) à des **dates** précises (grâce à une base de temps interne au module, matérialisée par un compteur initialisé modulo 20000), grâce à une mémoire cache.

La production de l'ordre lorsque la date échoit peut s'accompagner d'une demande d'interruption. Le rôle du programmeur se limite donc à chaque commutation de la sortie, de donner l'ordre suivant (complémentation) à la date suivante (lecture de table), jusqu'à produire une période de 20ms.

7. CONCLUSION

Les difficultés essentielles rencontrées par les étudiants se situent autour du transformateur, car à trois enroulements.

Notamment à vide, pour construire le courant magnétisant fourni par deux demi primaires. Notamment en charge, pour construire les courants primaires, en respectant la continuité des variables



d'état (courant I_2 et flux dans le circuit magnétique du transformateur).

De façon plus générale, les erreurs d'interprétation du fonctionnement du convertisseur statique, ont pour origine un maigre souci de la continuité des variables d'état avec pour conséquence des réflexions du genre : « je commande mon transistor, donc il conduit... »

Une autre difficulté dans l'accomplissement du projet a pour origine un usage intensif de l'informatique

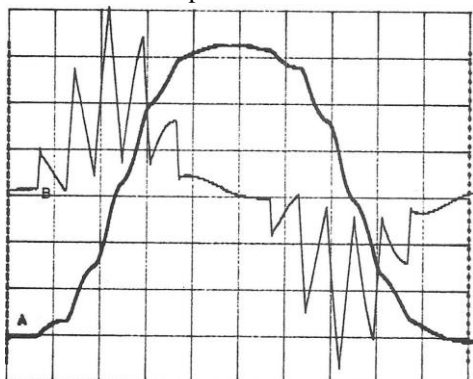
auquel nous les contraignons. Au-delà de l'effet gratifiant pour la formation, utiliser conjointement CIRCUIT pour simuler le dispositif, EUREKA et FOURIER pour l'étude du spectre théorique de l'onde, SAND pour l'étude du spectre expérimental, l'assembleur ASM96 et le moniteur ECM96 pour le développement de la commande, sans oublier CADKEY pour la DAO du circuit imprimé, nécessite un sérieux pouvoir d'adaptation renforcé par une utilisation "en pointillé" de ces logiciels.

De plus, nous avons remarqué que certains logiciels de part leurs performances, induisent une analyse plus fine des problèmes et mènent ainsi les étudiants à des réflexions bien éloignées des grands principes de base, et ne facilitant pas la compréhension globale. Malgré tout, l'intérêt de ces outils est tel, qu'il paraît impossible aujourd'hui (*en 1993*) d'envisager l'étude d'un projet "à la main".

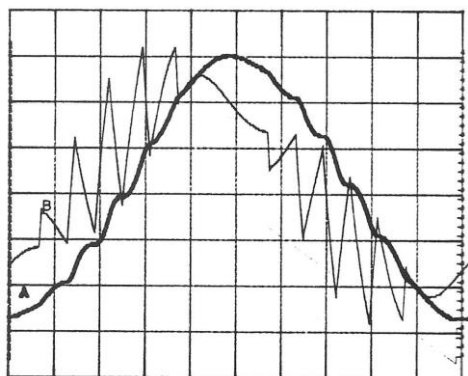
8. RELEVES EXPERIMENTAUX

Essais réalisés à demi-puissance pour $E = 24V$

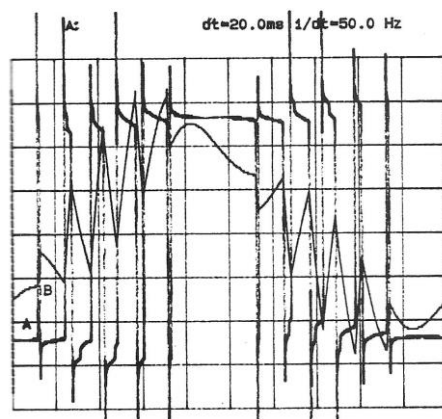
- A : Tension de sortie : 50V/div
- B : Courant secondaire : 1A/div
- Base de temps : 2ms/div



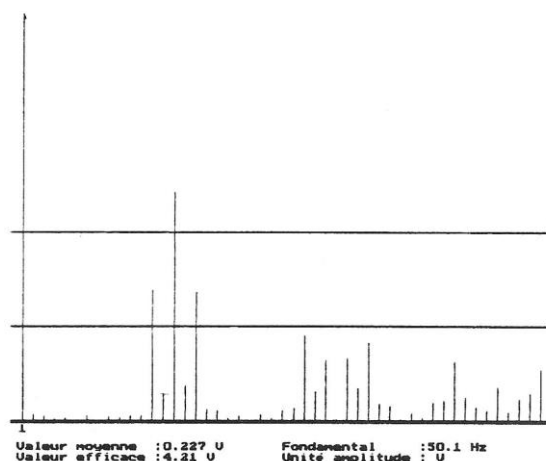
Fonctionnement à vide



Fonctionnement en charge



Tension secondaire U_2 en charge



Spectre de U_2 en charge

9. BIBLIOGRAPHIE

- Rapport de jury d'agrégation externe de génie électrique 1991,
- Revue CNDP sciences et techniques industrielles : N°59 et N°62



Les transformateurs électriques Fonctionnement, mise en oeuvre et exploitation

Michel Lambert

DUNOD

Les transformateurs sont des éléments essentiels des réseaux d'énergie électrique à haute tension. Ils participent à la recherche de l'efficacité énergétique et à la sûreté d'approvisionnement.

Le but de cet ouvrage est de mettre en perspective les rôles des transformateurs dans les réseaux publics et industriels. Il précise leurs conditions de mise en oeuvre et d'exploitation ainsi que leur impact sur les systèmes électriques déséquilibrés et sur le fonctionnement des plans de protection.

Il est dédié aux ingénieurs et techniciens impliqués dans la conception et l'exploitation des réseaux d'énergie électrique à haute tension. Il sera également utile aux enseignants et aux étudiants en génie électrique.

Points forts :

Un contenu issu de l'expérience de l'auteur sur le terrain.

Des exemples pratiques.

Une lecture facilitée par 199 figures et 60 tableaux.

Des recommandations pour la mise en oeuvre des transformateurs.

Des compléments d'information concernant les spécifications.

Publics

Ingénieurs et techniciens en génie électrique : production, transport et consommation de l'électricité

Enseignants et élèves des écoles d'ingénieur (orientés électrotechnique)

Enseignants des IUT (GEII).



Le power to gas Stockage de l'électricité d'origine renouvelable

Méziane Boudellal

DUNOD

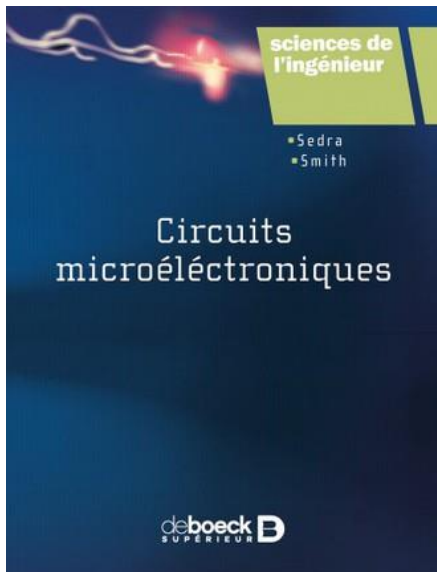
Le Power-to-Gas consiste à transformer en hydrogène par électrolyse l'excédent d'électricité produit par les sources d'énergies renouvelables.

Cet hydrogène peut être utilisé directement, stocké ou transformé en méthane.

Cette technologie, déjà en expérimentation, permet aujourd'hui de répondre aux besoins de stockage de l'électricité d'origine renouvelable dont les excédents vont devenir de plus en plus importants.

Cet ouvrage propose un état de l'art sur ce nouveau procédé : production et consommation d'électricité, électricité d'origine renouvelable, conversion en hydrogène ou en méthane ainsi que leur stockage.

Les installations en expérimentation ou opérationnelles sont aussi décrites montrant les nombreuses possibilités de cette technologie innovante.



Circuits microélectroniques

Kenneth C. Smith, Adel S. Sedra

DEBOECK

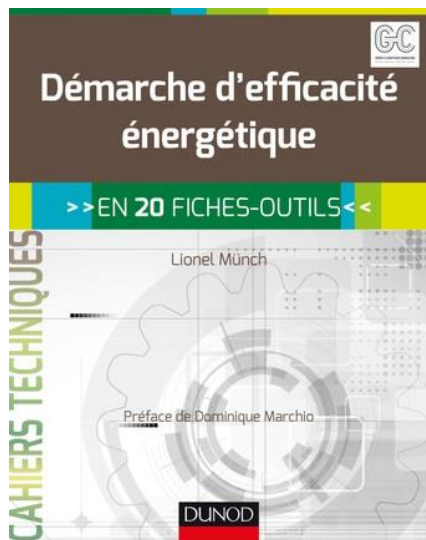
Une référence en français pour les cours abordant les circuits électroniques analogiques et digitaux, ce livre couvre les composants de base tels que la diode, les transistors bipolaires et MOSFET, ainsi que les circuits qui en découlent.

Un outil complet

L'accent est mis sur l'acquisition des méthodes d'analyse des circuits électroniques modernes : amplificateurs opérationnels, filtres, références de tension, convertisseurs analogiques digitaux (D/A et A/D), boucles à verrouillage de phase (PLL), oscillateurs, mélangeurs (mixers) et circuits de télécommunication. Cet ouvrage étudie également l'analyse de l'architecture des circuits, la réponse en fréquence, le bruit, etc. Parmi les circuits digitaux, seront abordés l'inverseur CMOS et différents circuits mémoire : verrous (latch), bascules (flip-flop), mémoires flash, etc.

L'objectif de ce livre

L'objectif de ce livre est de développer chez le lecteur la capacité d'analyse et de conception des circuits électroniques analogiques et digitaux, discrets et intégrés. Le sujet des circuits analogiques est largement couvert et l'accent est mis sur la conception des circuits analogiques intégrés. En effet, les progrès de la technologie de fabrication et d'intégration rendent inévitable l'acquisition des méthodes d'analyse des circuits analogiques, même pour les circuits digitaux. L'analyse est facilitée par les outils de simulation, largement utilisés dans l'industrie et qui deviennent de plus en plus abordables et à la portée de chacun.



Démarche d'efficacité énergétique En 20 fiches-outils

Lionel Munch

DUNOD

Cet ouvrage aborde les aspects technologiques et fonctionnels d'un projet d'amélioration d'efficacité énergétique dans le bâtiment. La démarche est détaillée au travers de cinq dossiers :

Bases techniques : énergie consommée dans le bâtiment, types de services énergétiques, principes d'un plan de mesure et de vérification, méthodes d'évaluation de rentabilité des investissements.

Pré-analyse du projet : réunion de démarrage, collecte des données, pré-analyse des installations, pré-analyse des consommations, pré-analyse thermique.

Analyse du projet : réaliser la visite de site, réaliser l'état des lieux, modéliser les consommations, élaborer une liste d'APE.

Création d'un bouquet d'APE : calculer les économies d'énergie, chiffrer et sélectionner les APE, rédiger et présenter le rapport final.

Projet de travaux : étude de conception, d'exécution et suivi des travaux, contrôle et mise au point des installations, suivi et analyse des consommations.

Découpé en 20 fiches-outils et traité de façon synthétique et pratique, l'ouvrage s'adresse aussi bien aux professionnels du bâtiment (architectes ou ingénieurs) qu'aux bureaux d'études et aux étudiants de la filière énergétique.



Les robots : apprendre la robotique par l'exemple

Vincent Maille, Cyprien Accard, Bruno Breton

ELLIPSES

L'initiation à la robotique est de plus en plus présente dans les programmes scolaires que ce soit en collège avec l'introduction du codage, ou dans des projets EPI (Enseignements Pratiques Interdisciplinaires), ou bien au lycée avec le développement de la spécialité ISN (Informatique et Sciences du Numérique) et l'enseignement d'exploration ICN (Informatique et Création Numérique). Grâce à une démarche progressive, pédagogique et surtout ludique, les auteurs vous initient aux premiers rudiments de la robotique.

À travers l'étude de trois systèmes différents vous pourrez découvrir la programmation en Python en réalisant différentes missions virtuelles du monde de Reeborg. Pour un coût modeste, vous pourrez aussi réaliser votre propre robot à programmer à l'aide d'une carte Arduino dans un langage proche du C. Enfin, les plus créatifs pourront créer en LEGO(r) des robots plus élaborés grâce à Lego Mindstorms(r) et sa programmation simple via la technologie LabView(Tm). L'originalité de ce livre est son approche par thématiques déclinées suivant les trois systèmes étudiés. Les apports théoriques sont volontairement réduits à l'essentiel pour ne présenter que les fonctionnalités de base. Chaque chapitre comporte à la fois de nombreux exemples concrets et illustrés et surtout des exercices pour vous permettre de vous approprier ou d'approfondir les notions étudiées.



Traitement du signal analogique acoustique

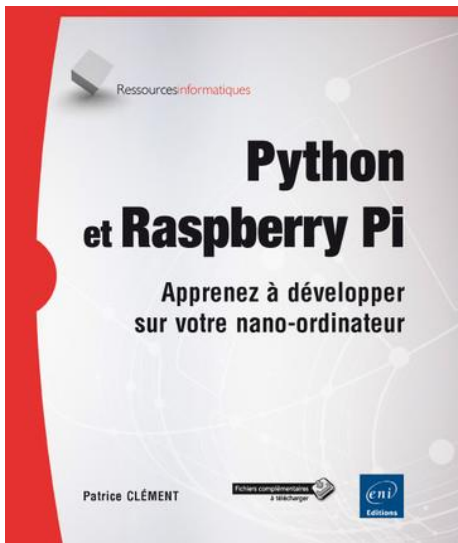
Stéphane Gautier, Arnaud Margolle

VUIBERT

Tout le programme de sciences physiques, en deux volumes, appliqué à l'Audiovisuel.

L'objectif de ce projet en deux volumes est d'apporter un soutien complet en physique aux étudiants des formations initiales en audiovisuel (BTS et Licence). Il s'appuie sur les enseignements dispensés en physique et sciences industrielles au baccalauréat STI2D et développe le champ des connaissances requises pour ces formations, depuis les savoirs fondamentaux jusqu'aux applications directes.

Chaque chapitre comporte un QCM permettant d'évaluer rapidement la connaissance du cours. Il est complété par des exercices de difficultés progressives (3 niveaux) tirés de sujets d'examens avec la solution complète pour faire progresser l'étudiant sur le plan méthodologique.



Python et Raspberry Pi ***Apprenez à développer sur votre nano-ordinateur***

Patrice Clément

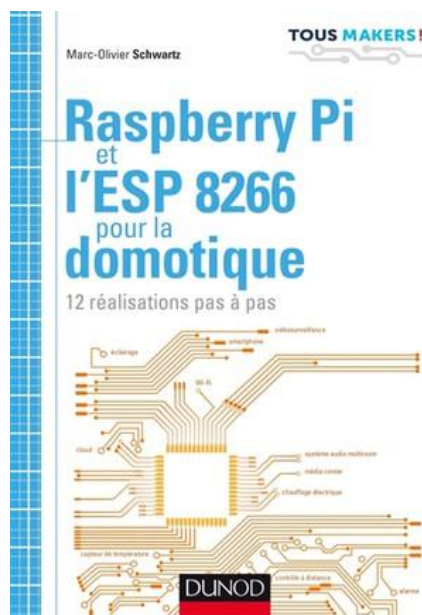
ENI

Ce livre est une introduction au langage Python en utilisant le nano-ordinateur Raspberry Pi. Il s'adresse à toute personne désireuse d'apprendre ce langage de façon ludique et ne nécessite pas de connaissances particulières en développement ou en électronique. Toutefois, des connaissances d'un environnement Linux/Unix sont souhaitables pour tirer le meilleur profit du livre.

Le chapitre 1 explique les quelques bases à connaître afin de gérer correctement le Raspberry Pi et y installer des modules Python. Les chapitres 2 et 3 constituent une introduction à Python, des fonctions de base jusqu'à quelques subtilités du langage. Le chapitre 4 couvre l'écriture de tests unitaires tandis que le chapitre 5 explique comment utiliser le langage pour écrire des scripts d'administration système.

Les chapitres qui suivent sont beaucoup plus orientés "pratique". Le chapitre 6 constitue une introduction à la programmation console avec la bibliothèque curses tandis que le chapitre 7 se concentre sur la programmation d'interfaces graphiques en se basant sur la bibliothèque tkinter. Le chapitre 8 présente les aspects multimédia et audio du Raspberry Pi ; notamment comment dessiner avec Pillow ou comment manipuler l'audio avec pyalsaudio. Puis, le chapitre 9 détaille les modules nécessaires au développement web sur le Raspberry Pi tandis que le chapitre 10 explique au lecteur la persistance de données.

Enfin, le chapitre 11 guide le lecteur dans la découverte et le fonctionnement des broches GPIO du Raspberry Pi.



Raspberry Pi et l'ESP 8266 pour la domotique ***12 réalisations pas à pas***

Marc-Olivier Schwartz

DUNOD

Le micro-ordinateur Raspberry Pi est un outil simple et puissant pour des installations domotiques. L'ESP 8266 est une puce Wifi compacte qui permet au Raspberry de communiquer sans fil. Ce composant, facile à programmer et bon marché (5 euros), possède un microprocesseur 32 bits qui le rend parfaitement autonome. Cela fait du système Raspberry Pi + ESP 8266 le couple idéal pour des applications de domotique ou d'Internet des objets.

Cet ouvrage détaille la réalisation d'une vingtaine de montages qui seront faciles à réaliser pour les makers.

Publics

Makers, amateurs d'électronique,

Etudiants et enseignants en domotique (IUT, licence Pro domotique...)

15 ans d'archives 3E.I en DVD

La SEE vous propose d'acquérir le DVD « archives » 3E.I regroupant tous les articles des numéros 0 à 59, de mai 1994 à décembre 2009, sous forme numérique (PDF scannés/ vectoriels).

Pour toute commande merci de remplir le bulletin joint ci-dessous et de l'envoyer à l'adresse indiquée :



BON DE COMMANDE

Raison Sociale :
Adresse :
Ville :
Tel. :
E-mail :

Nom du contact : M/Mme
Pays :
Fax :

	France et pays de l'Union Européenne	Hors Union Européenne
Tarif individuel	60 €	70 €
Tarif collectivité (CDI, laboratoires...)	100 €	110 €

MONTANT TOTAL DE LA COMMANDE :€ HT soit€ TTC (TVA 20%).

REGLEMENT:

- Par chèque bancaire à l'ordre de la « SEE »
- Par virement bancaire :
BNP Paribas, Paris Associations (02837)

RIB: 30004 00274 00010336242 58
IBAN: FR76 3000 4002 7400 0103 3624 258
BIC: BNPAFRPPAA

Date, Lieu

Cachet, Signature
(Précédés de la mention "lu et approuvé")

Contact : Aurélie BAZOT
Tél : 01.56.90.37.17 – aurelie.bazot@see.asso.fr

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

17, rue de l'Amiral Hamelin
75783 Paris Cedex 16
www.see.asso.fr



